



Majelis Guru Besar
Institut Teknologi Bandung



Majelis Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

Pidato Ilmiah Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

Profesor Andriyan Bayu Suksmono

**PENGOLAHAN SINYAL KOMPLEKS
DAN
PENGINDERAAN KOMPRESIF**

22 Mei 2010
Balai Pertemuan Ilmiah ITB

Hak cipta ada pada penulis

Pidato Ilmiah Guru Besar
Institut Teknologi Bandung
22 Mei 2010

Profesor Andriyan Bayu Suksmono

PENGOLAHAN SINYAL KOMPLEKS
DAN
PENGINDERAAN KOMPRESIF



Majelis Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

Judul: PENGOLAHAN SINYAL KOMPLEKS DAN
PENGINDERAAN KOMPRESIF
Disampaikan pada sidang terbuka Majelis Guru Besar ITB,
tanggal 22 Mei 2010.

Hak Cipta dilindungi undang-undang.

Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini dalam bentuk apapun, baik secara elektronik maupun mekanik, termasuk memfotokopi, merekam atau dengan menggunakan sistem penyimpanan lainnya, tanpa izin tertulis dari Penulis.

UNDANG-UNDANG NOMOR 19 TAHUN 2002 TENTANG HAK CIPTA
1. Barang siapa dengan sengaja dan tanpa hak mengumumkan atau memperbanyak suatu ciptaan atau memberi izin untuk itu, dipidana dengan pidana penjara paling lama 7 (tujuh) tahun dan/atau denda paling banyak Rp 5.000.000.000,00 (lima miliar rupiah). 2. Barang siapa dengan sengaja menyiarkan, memamerkan, mengedarkan, atau menjual kepada umum suatu ciptaan atau barang hasil pelanggaran Hak Cipta atau Hak Terkait sebagaimana dimaksud pada ayat (1), dipidana dengan pidana penjara paling lama 5 (lima) tahun dan/atau denda paling banyak Rp 500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah).

Hak Cipta ada pada penulis
Data katalog dalam terbitan

Andriyan Bayu Suksmono
PENGOLAHAN SINYAL KOMPLEKS DAN PENGINDERAAN KOMPRESIF
Disunting oleh Andriyan Bayu Suksmono

Bandung: Majelis Guru Besar ITB, 2010
vi+64 h., 17,5 x 25 cm
ISBN 978-602-8468-16-9
1. Teknologi Telekomunikasi 1. Andriyan Bayu Suksmono

SINOPSIS

Tulisan ini menguraikan perkembangan terkini dan kontribusi dari penulis dalam bidang pengolahan sinyal dan pencitraan. Bagian pertama menjelaskan teori dan penggunaan dari pengolahan sinyal yang bernilai kompleks, sedangkan bagian kedua menjelaskan dasar-dasar penginderaan kompresif dan aplikasi yang berhasil dikembangkan oleh penulis.

Penulis mulai menekuni pengolahan sinyal kompleks sejak menempuh program doktor di Universitas Tokyo (1999-2002). Topik tentang pengolahan sinyal kompleks sangat menarik, bukan hanya karena saat itu masih jarang yang melakukan penelitian dalam bidang ini, tetapi juga karena bilangan kompleks sendiri memiliki arti yang sangat mendalam. Bagian pertama dari tulisan ini menjelaskan alasan perlunya pengolahan sinyal kompleks secara khusus, model stokastik sinyal kompleks dimensi dua, algoritma pengolahan sinyal kompleks, dan beberapa contoh aplikasinya.

Pada bagian kedua akan dijelaskan paradigma terbaru didalam penginderaan atau pencitraan, yaitu yang didasarkan pada pencuplikan kompresif. Topik ini sangat menarik karena batas pencuplikan Shannon dapat dilampaui tanpa merusak hasil rekonstruksi. Hal ini akan berdampak pada peralatan pengindra atau pencitra yang bekerja

semakin cepat dan data hasil akuisisi yang semakin ringkas. Dua macam aplikasi dari penginderaan kompresif juga akan dijelaskan, yaitu radar pensintesa frekuensi kompresif dan teleskop radio interferometri kompresif. Kedua aplikasi tersebut juga dikembangkan oleh penulis bersama dengan anggota tim peneliti.

DAFTAR ISI

SINOPSIS..... iii

DAFTAR ISI v

BAGIAN I: PENGOLAHAN SINYAL KOMPLEKS 1

1. Pendahuluan 1

2. Bilangan Kompleks dalam Elektroteknik 3

3. Sinyal Kompleks Butuh Perlakuan Khusus 5

 3.1. Eksperimen Liem-Oppenheim 5

 3.2. Sifat Non-linier Citra Fasa 7

4. Pengolahan Sinyal Kompleks 8

 4.1. Pengolahan Sinyal Kompleks Dimensi Satu: Neuro-Beamforming 10

 4.2. Pengolahan Sinyal Kompleks Dimensi Dua 14

 4.2.1 CMRF: Sebuah Model Stokastik Sinyal Kompleks 14

 4.2.2 Aplikasi Pengolahan Sinyal Kompleks 18

 4.2.2.1 Segmentasi Citra Kompleks InSAR 19

 4.2.2.2 Restorasi Citra Kompleks InSAR 21

 4.2.2.3 Pengolahan Citra Fasa: Phase Unwrapping dengan Metoda Progesiff 23

BAGIAN II: PENGINDERAAN KOMPRESIF DAN APLIKASINYA.. 27

1. Pendahuluan 27

2. Prinsip Ketidakpastian dan Kompresi Data 31

2.1 Prinsip Ketidakpastian pada Kawasan Kontinyu	31
2.2 Prinsip Ketidakpastian pada Kawasan Diskrit	33
3. Formulasi Metode Penginderaan Kompresif	35
3.1 Representasi Sinyal dengan Kamus Basis	35
3.2 Pencarian Basis Ideal	38
3.3 Teorema Pencuplikan Kompresif	41
4. Aplikasi dari Penginderaan Kompresif	43
4.1 Radar Pensintesa Frekuensi Kompresif	43
4.2 Teleskop Radio Interferometri Kompresif	47
PENUTUP	53
UCAPAN TERIMA KASIH	54
DAFTAR PUSTAKA	56
CURRICULUM VITAE	59

BAGIAN I

PENGOLAHAN SINYAL KOMPLEKS

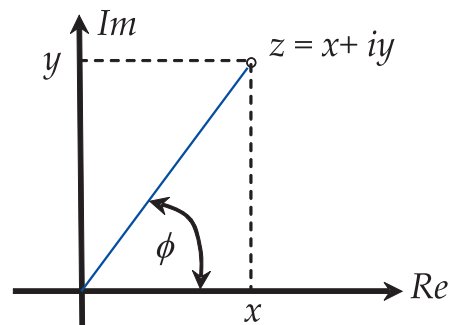
1. Pendahuluan

Sebuah konsep akan mudah difahami jika konsep tersebut dapat dikaitkan dengan pengalaman sehari-hari. Sebagai contoh, seorang peternak sapi dapat menghubungkan konsep bilangan bulat positif 1, 2, 3, ... , dst dengan jumlah sapi yang dimilikinya. Meskipun sedikit lebih sulit, bilangan nol dan bilangan negatif masih dapat difahami oleh peternak tersebut: nol berarti sapinya sudah habis terjual, sedangkan -5 dapat diartikan bahwa dia berhutang lima ekor sapi. Didalam konteks inilah bilangan imajiner tidak mudah untuk difahami.

Bilangan imajiner pertama kali diperkenalkan oleh Gerolamo Cardano (1501-1576) didalam bukunya *Ars Magna*. Bilangan imajiner diperlukan untuk menjawab masalah mencari akar dari polinomial. Sebagai ilustrasi sederhana, sebuah persamaan kuadrat $x^2 - 5x + 6 = 0$ memiliki solusi $x = \{3, 2\}$ yang dapat diperiksa dengan melakukan substitusi. Sebaliknya, persamaan kuadrat $x^2 + 1 = 0$ hanya dapat dipecahkan jika terlebih dahulu didefinisikan bilangan $\sqrt{-1}$. Buku *La Géométrie* karya René Descartes (1596-1650) menyebut $\sqrt{-1}$ sebagai bilangan imajiner.

Gabungan dari bilangan imajiner $i = \sqrt{-1}$ dengan bilangan riil akan membentuk sebuah bilangan kompleks $z = x + iy$, dimana x dan y

adalah bilangan riil. Bilangan kompleks dengan komponen riil dan imajiner dapat digambarkan pada sebuah bidang kompleks atau bidang *Argand*, seperti yang diperlihatkan pada Gambar 1.1. Dalam bentuk polar, bilangan kompleks z bisa dinyatakan sebagai $z = |z|\exp(i\phi)$. Leonhard Euler (1707-1783) membuktikan bahwa untuk suatu bilangan kompleks z , maka akan berlaku hubungan $z = |z|\exp(i\phi) = |z|(\cos\phi + i\sin\phi)$. Identitas ini dapat diperiksa dengan menguraikan fungsi eksponen dan fungsi trigonometri kedalam bentuk deret.



Gambar 1.1 Bidang kompleks atau bidang *Argand*

Kesulitan dalam memberikan makna terhadap bilangan imajiner tidak saja dialami masyarakat awam, seperti peternak sapi yang telah disinggung diatas, tetapi juga oleh kebanyakan kalangan akademis. Robert W. Lucky, seorang *Fellow IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers)*, memberi gambaran kesulitan memahami bilangan imajiner ini sebagai berikut [1]:

"... I remember well the day in high school algebra class when I was first introduced to imaginary numbers. The teacher said that because the square root of a negative number didn't actually exist, it was called imaginary."

That bothered me a lot. I asked, if it didn't exist, why give it a name and study it? Unfortunately, the teacher had no answers for these questions."

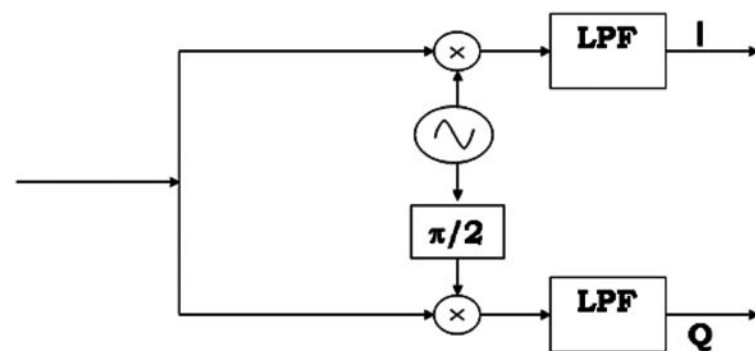
Benarkah bilangan imajiner atau bilangan kompleks tidak nyata dan oleh karenanya tidak bisa dipakai didalam kehidupan sehari-hari? Pembahasan berikut ini menunjukkan bahwa keadaannya tidak demikian.

2. Bilangan Kompleks dalam Elektroteknik

Bilangan kompleks mulai diperkenalkan kepada mahasiswa Elektroteknik untuk menyatakan sebuah fasor dalam kuliah Rangkaian Listrik dan Medan Elektromagnetik. Pada tingkat lanjut, matakuliah Pengolahan Sinyal Digital mengharuskan pemakaian bilangan kompleks ketika membahas transformasi Fourier diskrit. Hingga tahap ini, bilangan kompleks lebih berperan sebagai sebuah perangkat matematika yang memudahkan perhitungan, daripada kuantitas fisik yang dapat diukur.

Namun demikian, semua peralatan elektronik yang didalamnya terdapat perangkat demodulator I/Q (Gambar 1.2), akan menghasilkan sinyal atau data yang bernilai kompleks. Jika $I(t)$ menyatakan hasil pengukuran atau data keluaran jalur *inphase* pada saat t , sedangkan $Q(t)$ adalah keluaran pada jalur *quadrature* pada saat yang sama, maka keluaran dari demodulator I/Q dapat dinyatakan sebagai bilangan kompleks $z(t) = I(t) + iQ(t)$. Beberapa perangkat elektronik yang

menggunakan demodulator I/Q antara lain adalah: MRI (*Magnetic Resonance Imaging*), InSAR (*Interferometric Synthetic Aperture Radar*), *Network Analyzer*, dan Modem PSK (*Phase Shift Keying*) atau modem QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*).



Gambar 1.2 Diagram blok demodulator I/Q

Karena data keluarannya bernilai kompleks, maka citra keluaran dari MRI atau InSAR akan mengandung informasi magnitudo maupun fasa. Informasi fasa MRI dapat dipakai untuk menentukan pemisahan kandungan air dengan lemak didalam jaringan, atau menentukan sebaran kecepatan aliran darah. Citra fasa didalam InSAR dipakai untuk menentukan peta ketinggian (*DEM: Digital Elevation Map*) dari suatu daerah di permukaan bumi. Modem memanfaatkan bilangan kompleks untuk mengkodekan dan memperbesar jumlah lambang (*symbol*) informasi yang akan dikirimkan. Sedangkan keluaran dari pengukuran *Network Analyzer* akan berupa parameter-parameter bernilai kompleks yang menggambarkan sifat-sifat dan perilaku medan

elektromagnetik didalam saluran dan komponen elektronika RF.

3. Sinyal Kompleks Butuh Perlakuan Khusus

Karena sinyal kompleks dapat dipisahkan menjadi bagian riil dan bagian imajiner, yang masing-masing berupa bilangan riil, mengapa tidak memakai cara pengolahan biasa untuk setiap bagiannya? Kebutuhan akan algoritma atau metoda pengolahan sinyal kompleks memiliki dasar empiris dan matematis. Dua hasil penelitian yang berkaitan, yaitu: (i) eksperimen Lim-Oppenheim tentang peran penting informasi fasa, dan (ii) sifat non-linier dari fasa dan representasi sinyal kompleks, menunjukkan pentingnya informasi fasa dan representasi yang tepat dari suatu sinyal kompleks.

3.1 Eksperimen Liem-Oppenheim

Sekitar awal tahun 80-an, dua orang ilmuwan dari MIT (*Massachusetts Institute of Technology*), yaitu *Alan V. Oppenheim* dan *Jae S. Liem*, mengadakan sebuah eksperimen sederhana sebagai berikut [2]:

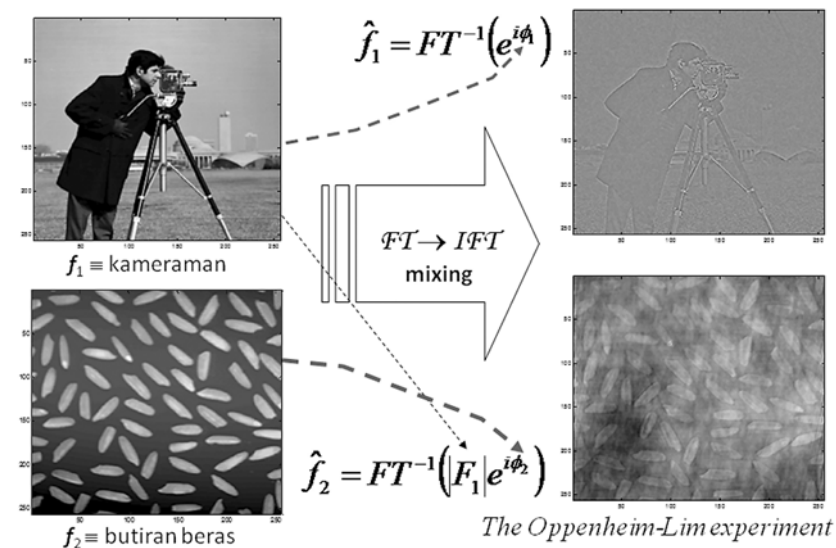
1. Ambil dua buah citra, misalnya citra kameraman f_1 dan citra butiran beras f_2 .
2. Lakukan transformasi Fourier pada kedua citra tersebut sehingga diperoleh $F_1 = FT(f_1) = |F_1| \exp(i\phi_1)$ untuk citra pertama dan $F_2 = FT(f_2) = |F_2| \exp(i\phi_2)$ untuk citra kedua, dimana $|F_1|$ dan $|F_2|$ adalah magnitudo Fourier, sedangkan ϕ_1 dan ϕ_2 adalah fasa

masing-masing.

3. Lakukan pencampuran sbb:

- Ambil fasa ϕ_1 dan isi magnitude-nya dengan konstanta (misalnya 1.0), kemudian lakukan inversi Fourier.
- Gabungkan $|F_1|$ dengan fasa ϕ_2 kemudian lakukan inversi Fourier.

Jika informasi yang terdapat didalam citra magnitudo lebih penting daripada yang terdapat didalam citra fasa, maka hasil inversi pada langkah 3.a akan berupa citra homogen, sedangkan pada langkah 3.b akan muncul citra kameraman.



Gambar 1.3 Hasil eksperimen Liem-Oppenheim yang diulang penulis

Hasil dari eksperimen ini, yang diulang oleh penulis, diperlihatkan pada Gambar 1.3. Jelas terlihat bahwa hal yang sebaliknya terjadi:

langkah 3.a menghasilkan citra kameraman, sedangkan langkah 3.b menghasilkan citra butiran beras. Hal ini menunjukkan bahwa informasi fasa justru lebih dominan/penting dibandingkan dengan magnitudo.

3.2 Sifat Non-linier Citra Fasa

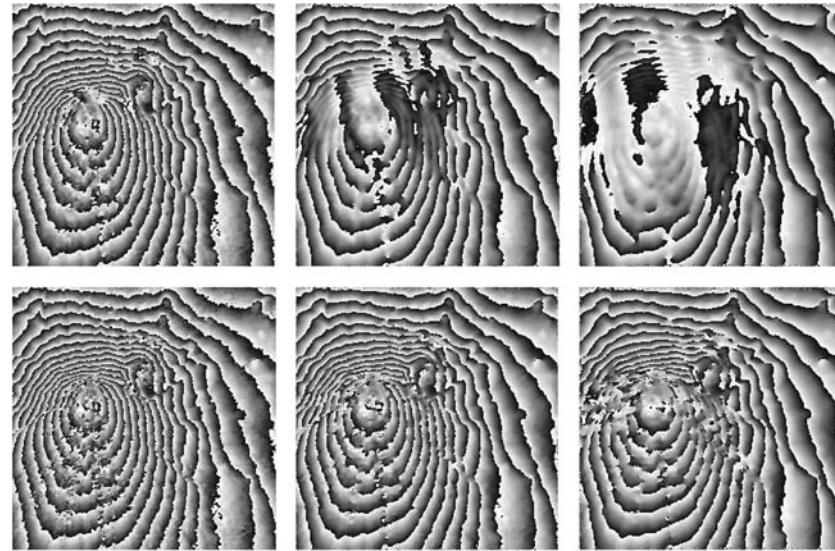
Pada awal tahun 2000-an, penulis melakukan studi perbandingan berbagai macam tapis statistik lokal (LSF-Local Statistic Filter) yang selama ini dipakai secara luas untuk mengolah citra fasa. Filter-filter LSF yang ada pada saat itu mengasumsikan citra fasa sebagai medan bilangan riil, oleh karena itu diperlukan berbagai macam modifikasi terhadap filter yang ada, misalnya dengan membuat filter tsb sensitif terhadap arah. Penulis mengajukan sebuah hipotesis bahwa, jika citra tersebut dinyatakan pada kawasan yang tepat, yaitu sebagai medan bilangan kompleks, maka berbagai macam kerumitan didalam LSF akan hilang dan formula dari tapis akan berubah menjadi bentuk yang sederhana.

Berdasarkan ekspansi Euler, sebuah bilangan kompleks z dapat dinyatakan sebagai

$$z = |z|e^{i\phi} = |z|\sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!} (i\phi)^n = |z|\left(1 + i\frac{\phi}{1!} - \frac{\phi^2}{2!} - i\frac{\phi^3}{3!} + \dots\right)$$

Penulis berhasil membuktikan bahwa semua LSF yang ada adalah hampiran orde-1, atau bentuk linier, dari LSF bernilai kompleks (CV-LSF). Selanjutnya dapat diramalkan bahwa semua LSF konvensional

akan gagal jika ukuran jendela filter diperbesar karena peran orde tinggi akan semakin dominan seiring dengan perbesaran jendela.



Gambar 1.4 Efek perbesaran ukuran jendela $3 \times 3 \rightarrow 5 \times 5 \rightarrow 7 \times 7$ untuk: LSF (citra pada baris atas) dan CV-LSF (citra pada baris bawah) [3]

Gambar 1.4 memperlihatkan hasil eksperimen yang menunjukkan fenomena ketidaklinieran citra dasa. Hasil ini telah disajikan pada pertemuan ilmiah mahasiswa Indonesia di Jepang pada tahun 2002 dan dimuat dalam *IEEE Geoscience Remote Sensing Letters* edisi bulan Oktober 2007 [3].

4. Pengolahan Sinyal Kompleks

Pembahasan terdahulu memperlihatkan pentingnya metoda atau algoritma pengolahan sinyal yang dikembangkan secara khusus untuk mengolah sinyal kompleks. Beda antara metode konvensional,

selanjutnya disebut sebagai pengolah sinyal riil, dengan pengolah sinyal kompleks jika diterapkan pada keluaran peralatan yang berupa sinyal kompleks adalah sebagai berikut:

- *Pengolah sinyal riil*: sinyal kompleks terlebih dahulu dipisahkan menjadi bagian riil dan bagian imajiner, atau bagian magnitudo dan fasa. Selanjutnya masing-masing bagian ini diolah oleh pengolah sinyal riil dan, jika diperlukan, keluaran masing-masing pengolah disatukan kembali, misalnya dengan proses penyatuan citra (*image fusion*).
- *Pengolah sinyal kompleks*: sejak dari awal, sinyal diperlakukan sepenuhnya sebagai deretan atau medan bilangan kompleks. Selanjutnya sinyal kompleks dimasukkan ke sistem pengolah kompleks dengan operasi yang sesuai. Pada akhir tahap, jika diperlukan, sinyal kompleks hasil olahan bisa dipisah untuk masing-masing keperluan, menjadi bagian riil dan imajiner atau bagian magnitudo dan fasa.

Belakangan ini beberapa kelompok peneliti telah mengembangkan berbagai macam sistem pengolah sinyal kompleks ini, antara lain:

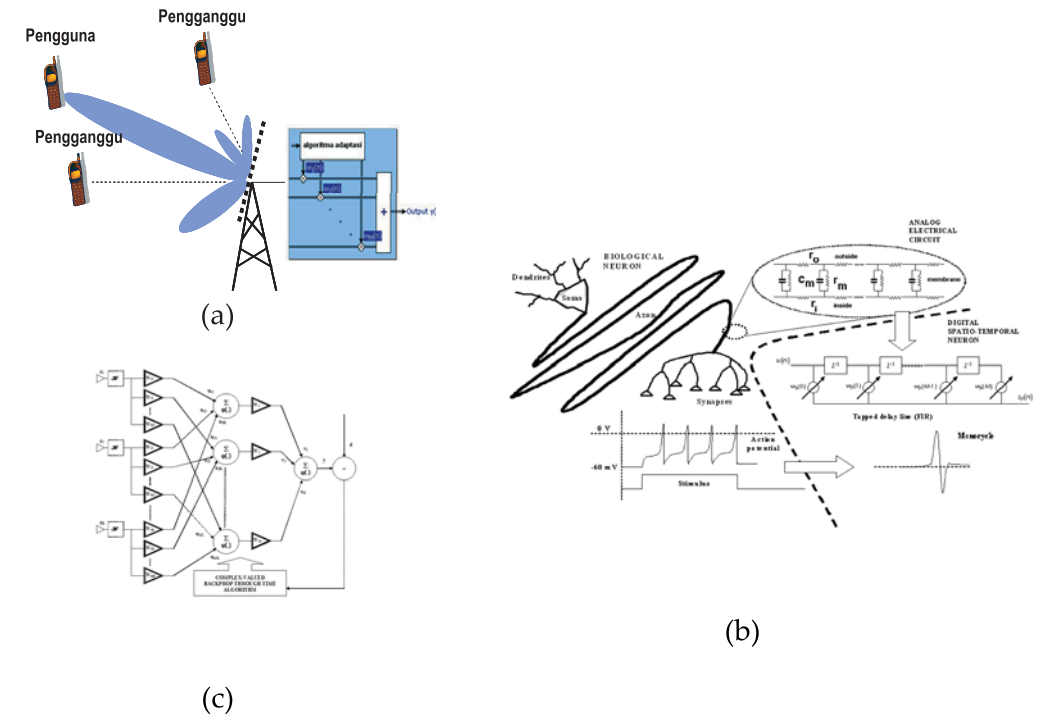
- Algoritma *Complex-LMS (Least Mean Square)* untuk pengolahan sinyal adaptif [4].
- Jaringan syaraf bernilai kompleks [5], [6]
- Pemilah dan pengenalan (*classification & recognition*) citra kompleks [7]

- Tapis citra kompleks berdasarkan model stokastik citra kompleks [8], [9]

Perkembangan didalam publikasi ilmiah belakangan ini memperlihatkan semakin bertambahnya ragam aplikasi yang didasarkan pada pengolah citra kompleks. Bahkan jaringan syaraf tiruan bernilai kompleks (CVNN-Complex Valued Neural Networks), mulai menjadi salah satu cabang penting dari komputasi cerdas (*Intelligent Computing*).

4.1 Pengolahan Sinyal Kompleks Dimensi Satu: Neuro-Beamforming

Pengarahannya berkas (*beamforming*) adalah kemampuan yang dimiliki oleh suatu sistem susunan pengindera (*sensor array*), misalnya susunan antena, untuk secara adaptif menangkap sinyal-sinyal yang diinginkan dan sekaligus menolak sinyal-sinyal pengganggu (*interference*). Di dalam peperangan elektronik, kemampuan seperti ini sangat penting untuk menghindari *jamming* dari lawan yang bertujuan mengganggu komunikasi antar pasukan. Pada situasi damai, teknik ini sangat bermanfaat didalam komunikasi nirkabel (*wireless*) seluler dan dikenal sebagai multipleksing ruang (SDMA-Spatial Division Multiple Acces) yang dapat memperbesar kapasitas kanal, seperti yang dilukiskan pada Gambar 1.5(a).



Gambar 1.5 Teknik *beamforming* yang dibuat berdasarkan prinsip pengiriman dan pengolahan informasi didalam jaringan syaraf makhluk hidup: (a) *Beamforming* pada komunikasi nirkabel (*wireless*), (b) jaringan syaraf: *spinal motor* menerima masukan dari *dendrite*, mengolah informasi didalam *soma*, menyalurkan melalui *axon*, dan berkomunikasi dengan sel lain melalui *synapse*. *Axon* dapat dimodelkan sebagai deretan rangkaian RC yang dalam bentuk digital akan menjadi TDL (*tap delay line*). Didalam jaringan syaraf, informasi berupa tegangan listrik diubah menjadi deretan impuls yang disebut sebagai *action potential*. Proses ini sangat mirip dengan modulasi frekuensi (FM/Frequency Modulation) didalam sistem komunikasi elektronik. Pada sistem yang dibuat, sinyal impuls ini berupa deretan *monocycle* yang dibangkitkan oleh radar UWB (*Ultra Wide-Band*); (c) diagram blok dari sistem *beamforming* UWB yang didesain [10].

Kemampuan suatu sistem komunikasi untuk membawa informasi sebanding dengan lebar pita kerja frekuensi pembawanya (*carrier*). Akhir-akhir ini sedang berkembang pesat teknik UWB (*ultra-wide band*)

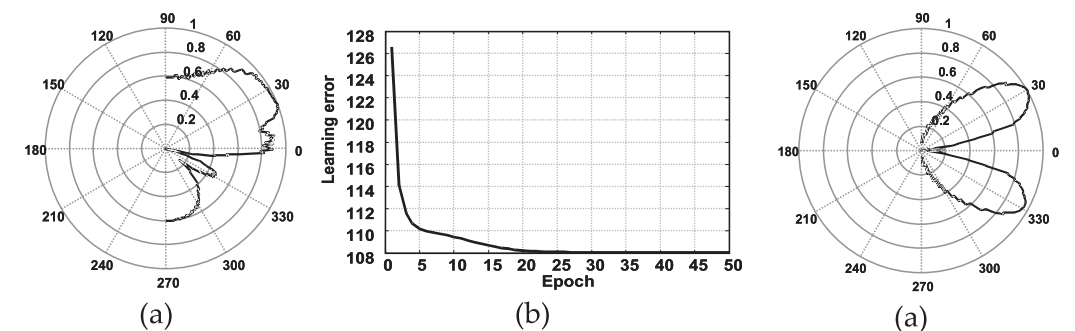
dalam komunikasi maupun pencitraan. Karena pita frekuensinya yang sangat lebar, maka informasi yang dapat dibawanya juga sangat besar. Tantangan muncul ketika sistem UWB perlu memiliki kemampuan *beamforming*. Sebagai solusinya, diajukanlah teknik *UWB neuro-beamforming* [10] yang didasarkan pada fenomena pengiriman dan pengolahan informasi didalam jaringan syaraf makhluk hidup (*neuron*), seperti diperlihatkan pada Gambar 1.5(b).

Secara fungsional, sebuah *neuron* terdiri dari *dendrite*, *soma*, *axon*, dan *synapse*. Seperti sel lainnya, *neuron* memiliki inti sel lengkap dengan aparatus metabolisme-nya. *Neuron* menerima masukan dari sel lain melalui *dendrite*, mengolah informasi didalam *soma*, dan akhirnya memberi keluaran berbentuk deretan impuls listrik (*action potential*). Informasi dikirimkan melalui *synapse* yang tersambung ke sel-sel lain, misalnya sel otot untuk perintah gerak, atau *neuron* lain di dalam otak untuk proses berfikir.

Axon dapat di-analogikan sebagai saluran transmisi yang dipakai oleh jaringan syaraf untuk berkomunikasi. Proses belajar didalam *neuron* dilakukan dengan modifikasi kekuatan sinaptik. Mirip seperti latihan untuk otot, kekuatan sinaptik akan semakin besar jika sering digunakan. Secara digital *axon* dapat dimodelkan sebagai TDL (*tap delay line*). Hal ini sangat sesuai dengan kebutuhan sistem pengolah sinyal pita lebar untuk melakukan *beamforming*. Seperti terlihat pada Gambar 1.5(b), impuls listrik adalah sebuah sinyal UWB. Di dalam eksperimen ini dipakai impuls *monocycle* yang dibangkitkan oleh radar UWB dan

kemudian ditangkap dengan sebuah *sampling scope* di Lab. IRCTR-TU Delft, Belanda.

Berdasarkan analogi dengan jaringan syaraf tersebut, dapat didesain suatu sistem *beamforming* UWB berupa jaringan syaraf lapis jamak (MLP-*multilayer perceptron*) dengan kemampuan mengolah data ruang-waktu (*spatio-temporal*), seperti diperlihatkan pada Gambar 1.5(c). Struktur ini merupakan modifikasi dari MLP biasa dengan tambahan kemampuan mengolah impuls UWB dan mengolah pembobot bernilai kompleks. Sistem ini dilengkapi pula dengan algoritma belajar CV-BPTT (*Complex-Valued Back Propagation Through Time*), yang merupakan perluasan algoritma propagasi balik yang telah ada. Baik struktur MLP *spatio-temporal* pita ultra-lebar berbobot kompleks, maupun algoritma belajar CV-BPTT adalah teknik baru yang berhasil ditemukan didalam riset ini dan merupakan salah satu penemuan penting dalam bidang jaringan syaraf tiruan [10].



Gambar 1.6 (a) Berkas awal dengan pembobot acak; (b) kurva belajar menunjukkan nilai kesalahan yang mengecil ketika algoritma CV-BPTT diterapkan ke sistem array; dan (c) sistem array mengarah ke sudut-sudut {30°, 330°} dan menekan sinyal pengganggu dari {60°, 0°, +300°} sesuai dengan yang diinginkan [10].

Selanjutnya sistem diujicobakan untuk memecahkan masalah *beamforming* berikut: impuls yang diinginkan akan datang dari sudut $\{30^\circ, 330^\circ\}$, sedangkan sinyal gangguan berasal dari arah $\{60^\circ, 0^\circ, 300^\circ\}$. Mula-mula pembobot dibuat bernilai acak dengan bentuk berkas seperti diperlihatkan pada Gambar 1.6(a). Kemudian, algoritma CV-BPTT diterapkan untuk menerima sinyal dari arah yang diinginkan dan menolak sinyal gangguan. Kurva belajar yang diperlihatkan pada Gambar 1.6(b) menunjukkan nilai kesalahan saat belajar turun secara asimptotis seiring berjalannya waktu belajar. Akhirnya, setelah proses belajar selesai, sistem berhasil melakukan *beamforming* UWB seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.6(c) dimana sinyal gangguan pada arah $\{60^\circ, 0^\circ, +300^\circ\}$ ditekan, sedangkan sinyal yang diinginkan dari arah $\{30^\circ, 330^\circ\}$ dikuatkan. Dengan demikian, sistem *beamforming* UWB yang terinspirasi dari jaringan syaraf makhluk hidup ini telah bekerja seperti yang diharapkan.

4.2 Pengolahan Sinyal Kompleks Dimensi Dua

4.2.1 CMRF: Sebuah Model Stokastik Sinyal Kompleks 2D

Model stokastik citra kompleks CMRF (*Complex-valued Markov Random Field*) adalah perluasan dari MRF (*Markov Random Field*). Sebelumnya, MRF telah dikenal luas sebagai model stokastik citra yang mampu merepresentasikan tekstur. Konsep MRF sendiri berasal dari suatu model didalam Fisika Statistik, yaitu model Ising dimensi dua (2D).

Model Ising dipakai untuk menjelaskan sifat magnetik bahan dan terjadinya transisi fasa dari sifat paramagnetik menjadi feromagnetik. Magnetisasi bahan berasal dari pusaran elektron yang memiliki dua macam spin, yaitu $\{-\frac{1}{2}, +\frac{1}{2}\}$. Kedua spin ini memberi arah magnetisasi (Utara-Selatan) yang berlawanan.

Suatu model Ising 2D adalah larik dimensi dua yang terdiri dari $N=M \times M$ tempat (situs). Setiap situs diasosiasikan dengan variabel spin, dengan $i = 1, \dots, N$ adalah indeks dari situs. Untuk suatu konfigurasi $\{s_i\}$ tertentu, energi dari konfigurasi sistem dinyatakan sebagai [11]

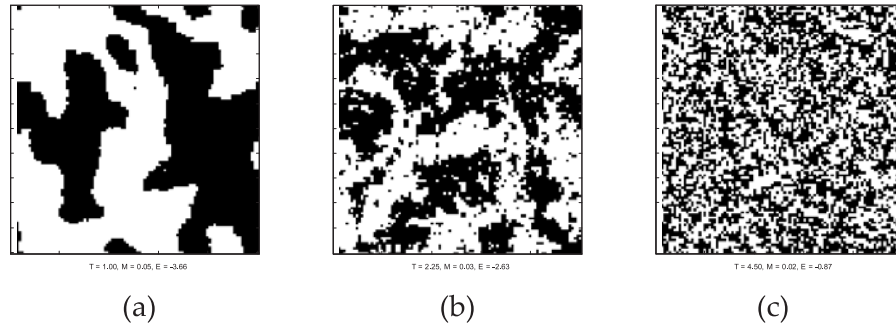
$$E\{s_i\} = -\sum_{\langle ij \rangle} \varepsilon_{ij} s_i s_j - H \sum_{i=1}^N s_i,$$

dimana $\langle ij \rangle$ menyatakan pasangan situs tetangga yang berdekatan (*nearest neighbor*), H adalah kuat medan magnet dari luar, dan ε_{ij} adalah konstanta kopling antara situs ke- i dengan situs ke- j .

Peluang sistem berada pada konfigurasi tertentu akan bergantung pada temperatur lingkungan T . Arah spin akan acak jika berada di dalam lingkungan bertemperatur cukup tinggi, yaitu diatas temperatur kritis (atau temperatur Curie) T_c . Pada keadaan yang demikian, bahan bersifat paramagnetik. Sebaliknya, jika suhu lingkungan berada dibawah T_c , maka bahan akan bersifat feromagnetik.

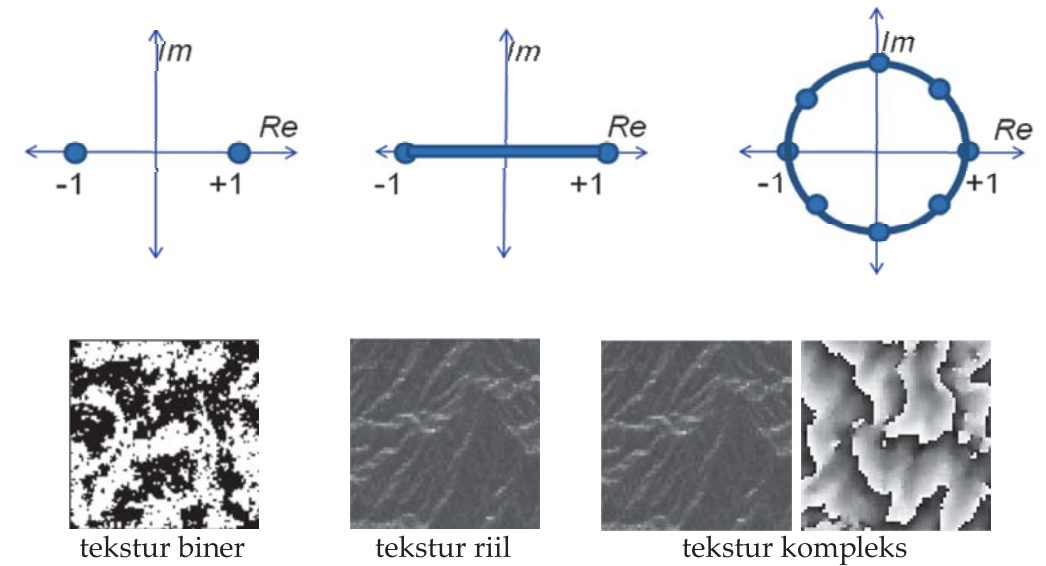
Sebaran dimensi dua dari nilai s_i , dimana nilai -1 dinyatakan sebagai piksel hitam dan nilai +1 dinyatakan sebagai piksel putih diperlihatkan pada Gambar 1.7. Pada gambar tersebut terlihat terjadinya transisi dari keteraturan (*order*) ketika $T < T_c$ kearah ketidakteraturan (*chaos*) saat $T > T_c$.

Keteraturan ditunjukkan dengan dominasi klaster besar, dan ketidakteraturan didominasi dengan klaster yang berukuran kecil yang tersebar acak. Pada saat bahan berada pada $T=T_c$, terjadilah fenomena kritis: pada skala berapapun selalu ada pencampuran dari klaster besar dengan klaster kecil.



Gambar 1.7 Hasil simulasi Monte-Carlo dari sebaran spin yang menggambarkan domain magnetik bahan: (a) $T < T_c$, (b) $T = T_c$, dan (c) $T > T_c$

Model MRF merupakan generalisasi dari model Ising 2D dengan membuat nilai spin, yang semula hanya bernilai diskrit -1 dan +1, menjadi bernilai kontinyu didalam selang $[-1, +1]$. Pada prakteknya, nilai tersebut dipetakan ulang ke rentang diskrit yang menyatakan derajat keabuan citra, misalnya $\{0, 1, 2, \dots, 254, 255\}$ untuk citra digital 8 bit. Suatu citra dengan tekstur tertentu akan dicirikan oleh nilai kekuatan interaksi J_{ij} dan konstanta H . Pemodelan citra kompleks menuntut generalisasi lebih lanjut menjadi spin yang bernilai kompleks, sehingga diperoleh complex-valued MRF atau CMRF. Gambar 1.8 menunjukkan proses generalisasi dari model Ising, ke MRF, menjadi CMRF dan contoh tekstur masing-masing model.



Gambar 1.8 Generalisasi model Ising 2D menjadi MRF dan CMRF. Citra di baris bawah menunjukkan contoh tekstur masing-masing.

Pada makalah [8] penulis berhasil menurunkan besaran-besaran penting dari CMRF, yaitu: nilai peluang, estimasi energi, dan parameter CMRF. Jika z_s menyatakan nilai spin kompleks pada suatu situs, maka nilai peluang suatu sistem CMRF adalah $P(z_s) = \frac{1}{Z} e^{-E(z_s)}$, dimana energi-

nya $E(z_s) = \frac{1}{2\sigma^2} \left(\left\| z_s - \sum_{t \in N_s} A_{st}^* z_t \right\|^2 \right)$. Jika diberikan suatu citra kompleks

tertentu, maka estimasi parameter CMRF adalah

$$\hat{A}^* = \left[\sum_{s \in S} z_s \mathbf{q}_s^* \right] \left[\sum_{s \in S} \mathbf{q}_s \mathbf{q}_s^* \right]^{-1}, \quad \text{dimana} \quad \hat{\sigma}^2 = \frac{1}{M \times N} \sum_{s \in S} \left\| z_s - \hat{A}^* \mathbf{q}_s \right\|^2 \quad \text{dan}$$

$\mathbf{q}_s = [z_{s+\tau_1}, z_{s+\tau_{-1}}, \dots, z_{s+\tau_{12}}, z_{s+\tau_{-12}}]^T$. Estimasi parameter ini selanjutnya dipakai untuk melakukan klasifikasi dan restorasi citra kompleks.

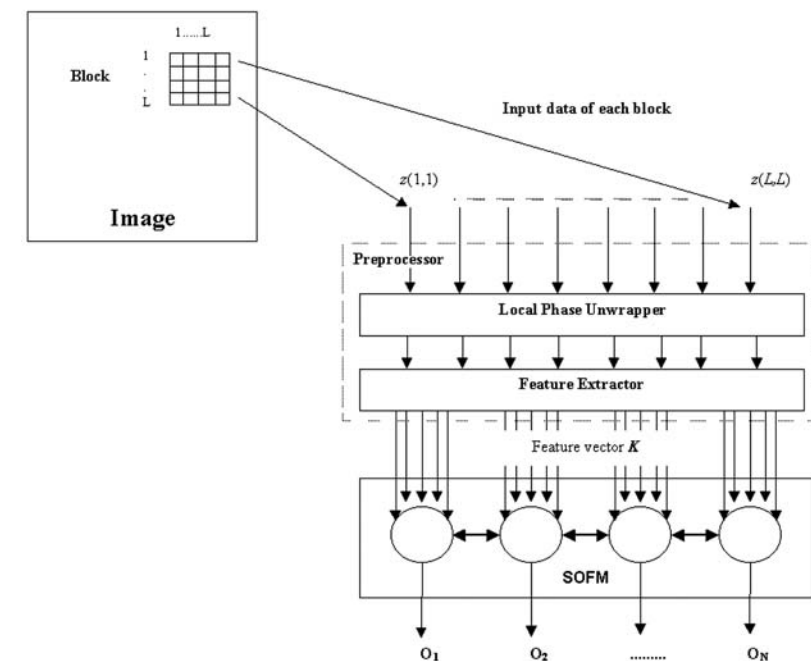
4.2.2 Aplikasi Pengolahan Sinyal Kompleks

Sistem pencitra Radar (*Radio Detection and Ranging*) telah dipakai secara luas dan berperan sangat penting dalam mempelajari Bumi pada skala global. Karena memanfaatkan frekuensi radio, sistem radar mampu melakukan pengamatan pada segala kondisi cuaca, baik siang maupun malam. Resolusi tinggi pada radar pencitra dapat dicapai berkat adanya teknik sintesa apertur, sehingga radar jenis ini disebut sebagai SAR (*Synthetic Aperture Radar*). Konfigurasi tertentu dari SAR dapat dimanfaatkan untuk melakukan pencitraan interferometrik (*InSAR: Interferometric SAR*), yang mampu memetakan profil ketinggian dari permukaan bumi.

Keluaran InSAR yang berupa citra magnitudo dan citra fasa dapat dipandang sebagai citra kompleks. Oleh karena itu, metoda pengolahan sinyal yang memperlakukan citra InSAR sebagai citra kompleks akan memiliki beberapa kelebihan dibandingkan dengan pengolahan magnitudo saja.

Citra fasa yang diukur oleh InSAR akan berupa fasa yang terlipat karena hanya bernilai dalam selang $[-\pi, \pi)$. Peta ketinggian dibuat dengan membuka lipatan fasa melalui proses PU (*phase unwrapping*). Meski PU sangat mudah dilakukan untuk sinyal dimensi satu, proses ini sangat sulit dilakukan untuk fasa dimensi dua. Kesalahan akibat derau dan pencuplikan ruang yang tidak mencukupi akan menjalar dan merusak informasi di seluruh citra.

Sub bab ini akan membahas tiga topik penting dalam pengolahan citra kompleks dari InSAR, yaitu: segmentasi, restorasi, dan pembukaan lipatan citra fasa. Metode yang sama dapat diterapkan untuk aplikasi citra kompleks lain, misalnya citra MRI.

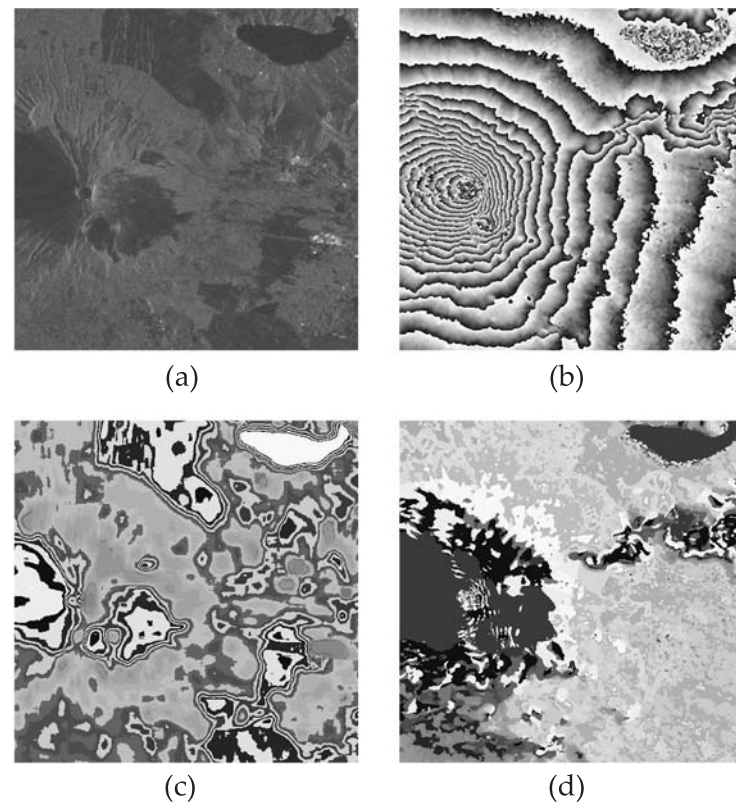


Gambar 1.9 Arsitektur CV-SOFM untuk melakukan segmentasi citra InSAR

4.2.2.1 Segmentasi Citra Kompleks InSAR

Segmentasi citra hasil penginderaan jarak jauh dipakai untuk mengklasifikasikan suatu citra dari permukaan bumi kedalam daerah-daerah tertentu yang diinginkan, misalnya, daerah pepohonan, pesawahan, dataran kering, dst. Segmentasi citra kompleks diajukan sebagai metoda untuk membedakan fitur daratan berdasarkan profil

reflektivitas daratan terhadap sinyal radar dengan memasukkan juga informasi profil ketinggian. Fitur sederhana dari CMRF orde satu telah dipakai untuk melakukan segmentasi dan hasilnya dibandingkan dengan segmentasi yang hanya berdasarkan citra magnitudo.



Gambar 1.10 Citra InSAR disekitar Gunung Fuji dan hasil segmentasi:
(a) citra magnitudo, (b) citra fasa, (c) segmentasi konvensional,
(d) segmentasi kompleks.

Gambar 1.9 menunjukkan arsitektur jaringan syaraf jenis SOFM (*Self-Organizing Feature Map*) yang telah dimodifikasi sehingga mampu mengolah data kompleks, sehingga disebut sebagai CV-SOFM. Citra masukan InSAR merupakan hasil pengamatan daerah disekitar

Gunung Fuji dan Danau Yamanaka di Jepang oleh sistem InSAR yang dibawa satelit JERS-1.

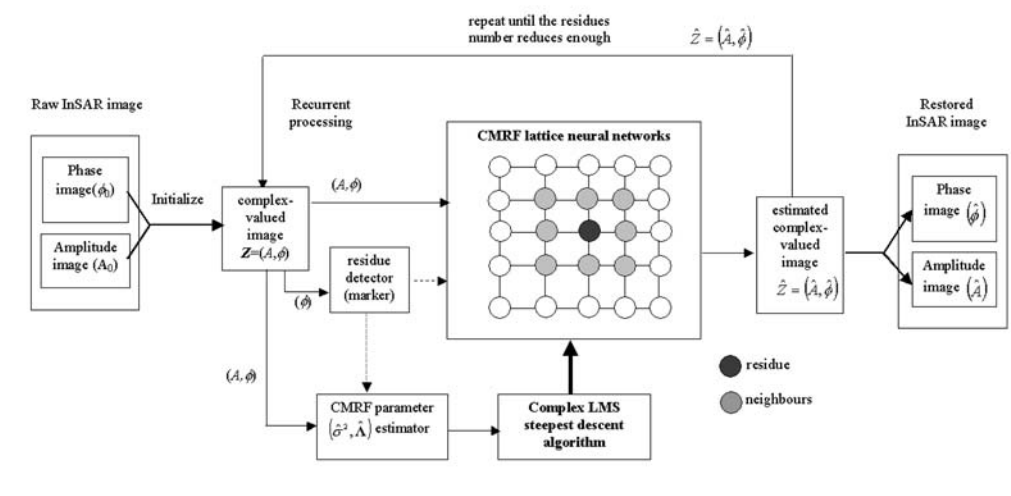
Citra magnitudo, citra fasa, dan citra hasil segmentasi dengan metoda konvensional maupun segmentasi dengan CV-SOFM diperlihatkan pada Gambar 10. Perbandingan hasil segmentasi antara metode konvensional dengan segmentasi kompleks menunjukkan keunggulan metode kompleks, dimana gunung Fuji, danau Yamanaka dan, perbukitan telah dikelompokkan dengan lebih baik.

4.2.2.2 Restorasi Citra Kompleks InSAR

Citra hasil pengamatan sistem pengindra selalu disertai dengan derau (*noise*). Keluaran dari sistem InSAR akan berupa citra kompleks yang disertai dengan derau pada bagian magnitudo maupun fasa-nya. Derau pada citra fasa akan menimbulkan ketidakkonsistenan berupa sekumpulan titik singular atau SP (*Singular Points*) yang sangat mengganggu proses PU. Mengurangi SP dengan melakukan penapisan citra fasa adalah suatu prosedur baku sebelum proses PU dilakukan.

Pengurangan SP dengan penapisan citra fasa perlu dilakukan secara hati-hati. Proses yang sembarangan boleh jadi menurunkan jumlah SP secara signifikan, akan tetapi merusak informasi detail. Metoda yang diajukan penulis [8], [9] memakai model CMRF untuk menangkap fitur citra kompleks dan melakukan penapisan sesuai dengan sifat medan kompleks dalam suatu jendela tertentu. Sifat tersebut dapat

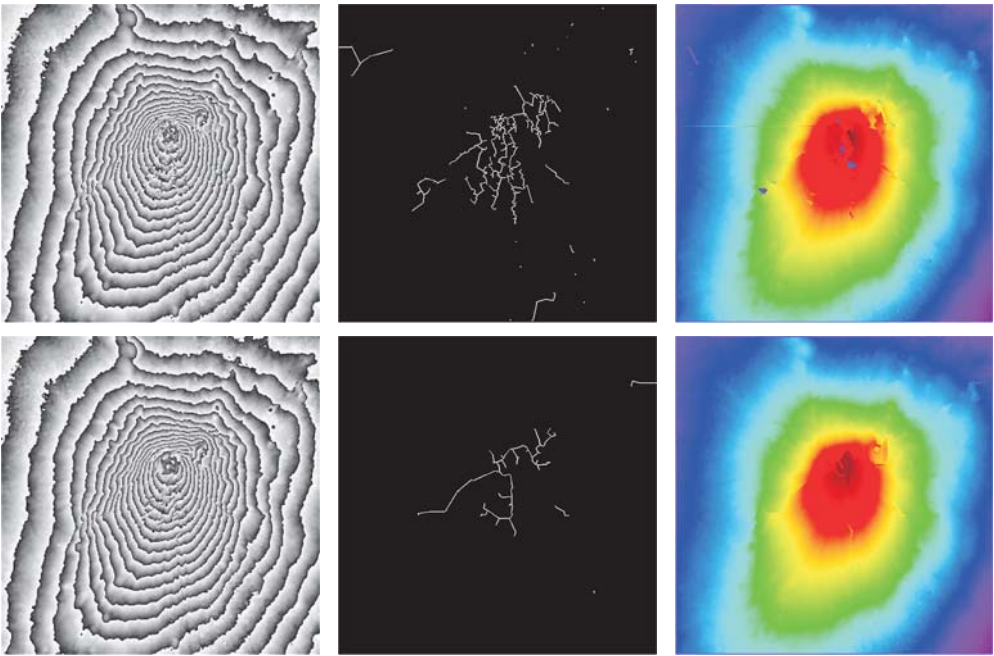
dikuantifikasi sebagai parameter CMRF, dengan perhitungan yang telah dijelaskan pada pembahasan terdahulu.



Gambar 1.11 Diagram blok penapisan berbasis CMRF [8]

Gambar 1.11 menunjukkan blok diagram proses penapisan dengan CMRF. Proses restorasi dapat dilakukan dengan dua cara, yaitu: (1) cara deterministik dengan algoritma *Steepest Descent LMS* [8] dan (2) cara stokastik dengan algoritma *Monte Carlo Metropolis* [9].

Hasil restorasi citra dan pengaruh-nya pada PU diperlihatkan pada Gambar 1.12. Baris pertama menunjukkan citra fasa, *branch-cut*, dan hasil PU jika fasa ditapis dengan cara konvensional. Baris kedua menunjukkan urutan jenis citra yang sama setelah penapisan CMRF dilakukan. Terlihat bahwa citra hasil PU dengan penapisan CMRF terbentuk dengan lebih baik dibandingkan citra PU dengan penapisan konvensional.



Gambar 1.12 Perbandingan citra fasa dan hasil PU dengan penapisan konvensional (bagian atas) dan dengan metoda CMRF (bagian bawah) [8]

4.2.2.3 Pengolahan Citra Fasa: Phase Unwrapping dengan Metoda Progresif

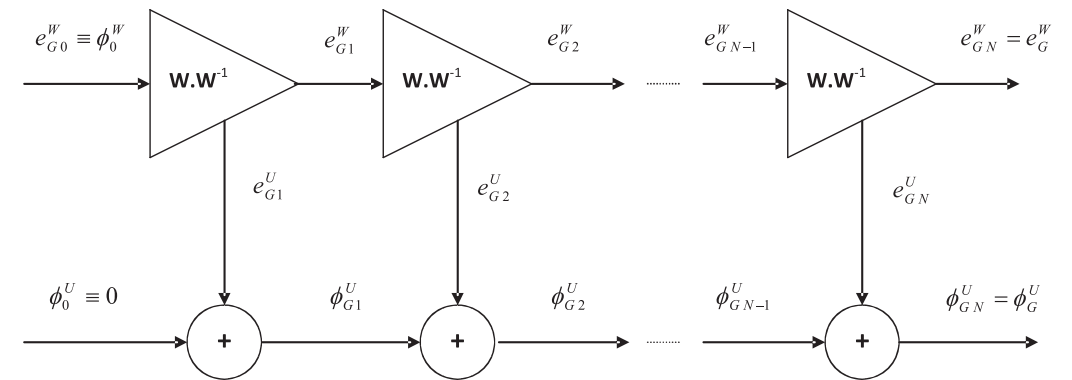
Citra fasa yang diperoleh dari sistem InSAR atau MRI hanya dapat memiliki tentang nilai satu periode, yaitu dari $-\pi$ sampai dengan $+\pi$. Ini karena sudut fasa dalam sistem pengindera tersebut diperoleh dengan cara mengambil invers sudut tangen, sehingga nilai fasa menjadi terlipat. Penggunaan informasi lebih lanjut memerlukan suatu langkah pengolahan untuk mendapatkan nilai yang sesungguhnya dengan membuka fasa terlipat melalui proses PU. Secara prinsip, proses PU dilakukan dengan integrasi atau kompensasi kelipatan (bulat) 2π setiap kali terjadi loncatan fasa. Karena derau fasa menyebabkan

ketidakkonsistenan fasa dalam bentuk SP, cara demikian justru akan menyebar kesalahan keseluruh citra.

Secara umum metode PU dapat dipilah menjadi dua kelompok, yaitu PU global dan PU lokal. PU lokal menandai daerah-daerah tidak konsisten dalam citra fasa. Selanjutnya integrasi dilakukan dengan menghindari daerah-daerah tidak konsisten tersebut. Sebaliknya, metoda PU global mereformulasikan masalah PU menjadi persamaan diferensial orde dua dan kemudian memecahkannya secara numerik. Dua hal penting yang menunjukkan kualitas suatu metoda PU adalah kemampuan dalam mempertahankan informasi detail dari hasil PU, dan kecepatan proses PU.

Metoda PU progresif [12] diajukan sebagai solusi kebutuhan masa depan bagi radar pencitra 3D yang dapat bekerja secara nyata-waktu (*real time*). Karena pada umumnya kualitas hasil PU (dalam hal mempertahankan informasi detail) biasanya bertentangan dengan kecepatan proses, metoda PU progresif dirancang dengan menerapkan prinsip-prinsip berikut:

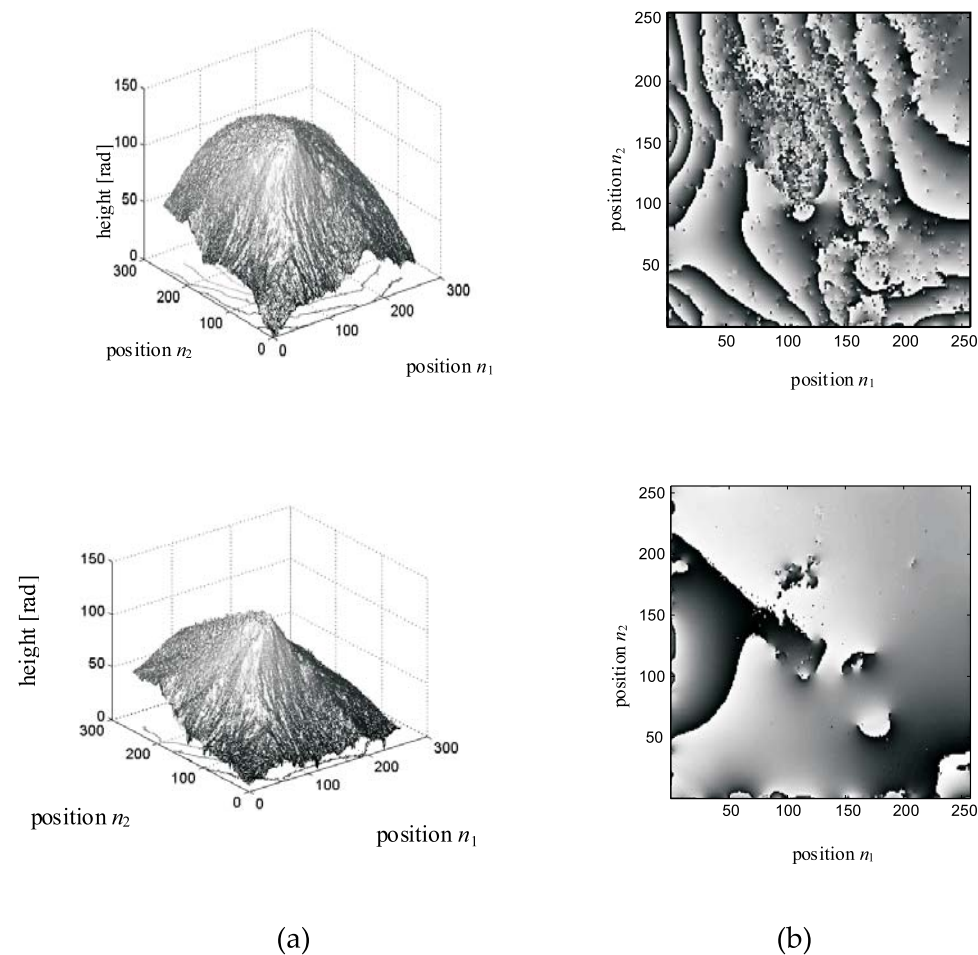
- Algoritma cepat: memakai transformasi Fourier untuk memecahkan persamaan diferensial dalam kerangka PU global.
- Prinsip daur ulang/*turbo*: mengolah kembali citra sisa untuk menambahkan informasi detail.
- Skalabilitas proses: memakai pengolah identik yang tersusun secara kaskade.



Gambar 1.13 Susunan kaskade pengolah PU dalam sistem PU progresif [12]

Gambar 1.13 menunjukkan diagram blok dari PU progresif. Setiap sub-bagian dari susunan kaskade identik dengan sub-bagian yang lain. Keluaran dari satu tahap akan berupa citra tak-terlipat dan citra sisa. Citra sisa selanjutnya diolah pada tahap berikutnya, lalu ditambahkan pada citra hasil PU sebelumnya. Dengan demikian, semakin lama kualitas citra dalam menggambarkan detail permukaan 3D akan semakin meningkat. Pengguna akan mengamati peta ketinggian 3D segera setelah citra diperoleh dan selanjutnya akan melihat citra yang semakin baik seiring dengan berjalannya waktu.

Gambar 1.14 menunjukkan hasil PU dan citra sisa pada keluaran tahap ke-1 dan tahap ke-10. Terlihat bahwa citra 3D gunung Fuji semakin baik dan lipatan-lipatan fasa dalam citra sisa semakin berkurang.



Gambar 1.14 Hasil PU dan citra residu pada keluaran [12]:
(a) tahap ke-1, dan (b) tahap ke-10

BAGIAN II

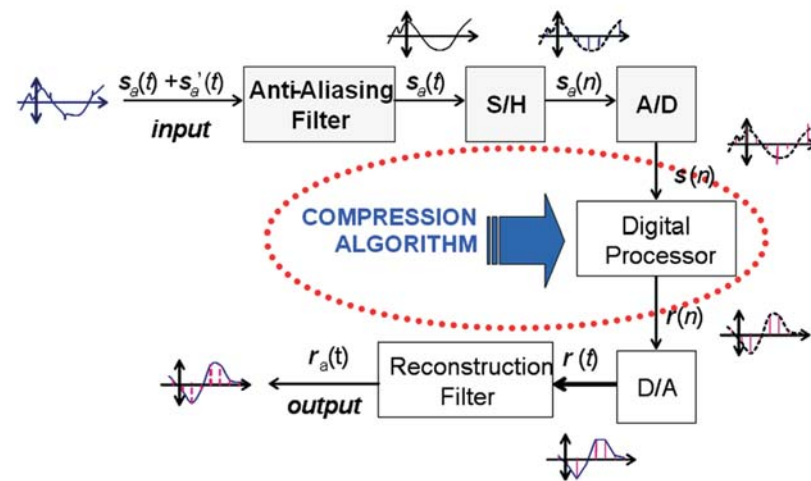
PENGINDERAAN KOMPRESIF DAN APLIKASINYA

1. Pendahuluan

Makhluk hidup memiliki indera sebagai alat untuk bisa mengetahui keadaan di sekitarnya supaya dapat memberikan tanggapan yang sesuai demi mempertahankan kelangsungan hidup. Perangkat atau sistem pengindra buatan (*sensing devices*) dipakai untuk memperbesar kemampuan penginderaan ini. Sebagai contoh, kamera dipakai untuk merekam peristiwa dalam bentuk citra (diam maupun bergerak), sistem radar dipakai untuk melihat benda yang letaknya jauh dan tidak bisa dideteksi akibat terhalang awan, pencitra sinar-X dibuat untuk melihat organ tubuh dalam yang tak kasat mata, dst.

Pada awal perkembangannya, peralatan pengindra tersebut menghasilkan keluaran berupa sinyal-sinyal analog. Penemuan ADC (*Analog-to-Digital Converter*) menambah kemampuan perangkat pengindra sehingga dapat menghasilkan data-data atau sinyal digital yang dapat diolah dan disimpan didalam komputer. Kini kamera digital, sistem radar digital, perangkat sinar-X digital, dst telah dipakai secara luas. Ditinjau dari berbagai aspek, peralatan pengindra digital ini memiliki kemampuan lebih baik jika dibandingkan dengan perangkat analog yang sama.

Proses pengolahan sinyal analog dengan sistem pengolah digital diperlihatkan pada Gambar 2.1. Pada blok diagram tersebut, sinyal analog yang ditangkap pengindera terlebih dulu disaring dengan tapis *anti-aliasing*. Tujuan penapisan ini adalah untuk membuang komponen frekuensi yang tidak diperlukan dan membatasi sinyal yang akan dicuplik pada pita frekuensi tertentu dengan lebar pita terbatas. Sinyal ini selanjutnya di ubah menjadi sinyal waktu diskrit oleh blok S/H (*Sample-and-Hold*), kemudian amplitudo sinyal dipetakan kedalam sekumpulan nilai diskrit pada kawasan digital. Keluaran dari blok A/D ini disebut sebagai sinyal digital.



Gambar 2.1 Blok diagram dasar dari pengolahan sinyal digital

Pada tahap berikutnya, sinyal digital diproses oleh sebuah pengolah sinyal digital (*digital signal processor*) sesuai dengan kebutuhan dan kemudian disimpan atau dikirimkan ketempat lain. Pada tahap penyimpanan atau sebelum pengiriman data, proses kompresi data bisa

dilakukan supaya data tersebut menjadi lebih ringkas supaya tidak memakan ruang simpan atau *bandwidth* yang terlalu besar.

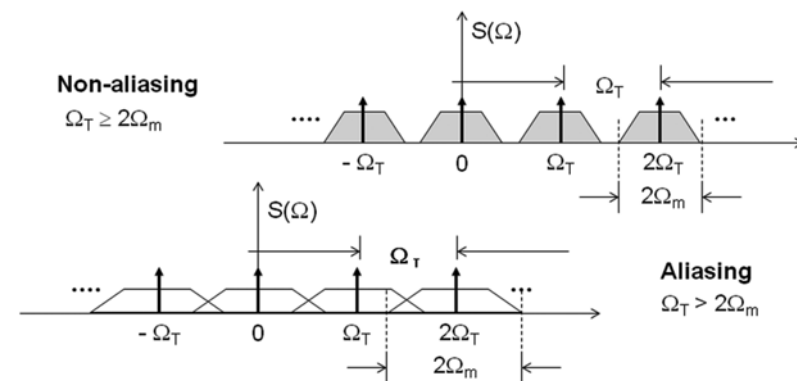
Pengguna dapat melihat atau memainkan lagi data digital tersebut setelah dikonversi menjadi sinyal analog. Pada tahap ini, data digital terlebih dahulu diolah didalam blok D/A (*digital to analog*), kemudian masuk ke tapis rekonstruksi (*reconstruction filter*). Sinyal analog keluaran tapis rekonstruksi ini selanjutnya dapat dinikmati oleh pengguna, misalnya, sebagai suara musik yang dikeluarkan oleh pengeras suara (*loudspeaker*) atau gambar yang tampil di layar.

Salah satu hal penting yang harus diperhatikan didalam pengubahan sinyal analog menjadi sinyal digital adalah laju pencuplikan minimum yang dibutuhkan supaya tidak timbul cacat rekonstruksi. Persyaratan ini dirumuskan sebagai teorema pencuplikan (*Shannon-Whitaker*) sebagai berikut [12]:

Suatu sinyal terbatas pita dengan lebar pita Ω_m memerlukan laju pencuplikan minimum sebesar $2\Omega_m$ agar sinyal tersebut dapat direkonstruksi kembali secara eksak.

Laju pencuplikan minimum ini disebut juga laju Nyquist (*Nyquist Rate*). Karena laju Nyquist sebanding dengan lebar pita dari sinyal, maka pencuplikan analog menganggap kandungan informasi dari sebuah sinyal ditentukan oleh jumlah komponen frekuensi yang dimilikinya. Jika persyaratan laju Nyquist ini tidak terpenuhi, sinyal hasil rekonstruksi akan mengalami cacat *aliasing*. Gambar 2.2 memperlihatkan gambaran kawasan frekuensi dari proses pencuplikan

sinyal. Cacat *aliasing* terjadi karena laju pencuplikan yang terlalu kecil membuat pita frekuensi sinyal saling tumpang-tindih.



Gambar 2.2 Terjadinya *aliasing* akibat pencuplikan dibawah laju Nyquist [13]

Seandainya pencuplikan boleh dilakukan dibawah laju Nyquist tetapi sinyal dapat direkonstruksi secara eksak, bukan saja proses akuisi data dapat dilakukan dengan lebih cepat, bahkan ruang simpan data juga akan dapat dihemat. Namun demikian, pencuplikan klasik tidak memungkinkan hal ini dapat terjadi. Disamping itu kompresi sinyal dengan cara mengambil sebagian kecil komponen yang penting dari sinyal dan membuang sebagian besar sisanya juga merupakan proses yang tidak efisien.

Penginderaan kompresif atau pencuplikan kompresif, selanjutnya disebut sebagai CS (*Compressed Sensing/Compressive Sampling*), adalah suatu paradigma baru dalam pengolahan sinyal, pencuplikan, dan penginderaan yang saat ini sedang berkembang pesat yang mampu menjawab kedua permasalahan tersebut. Metoda CS memungkinkan

rekonstruksi eksak suatu sinyal hanya dari sejumlah kecil (namun cukup) dari cuplikannya. Jumlah cuplikan ini jauh lebih sedikit dari kebutuhan minimum yang disyaratkan oleh pencuplikan klasik. Metoda CS juga menggabungkan pencuplikan dan kuantisasi kedalam satu proses sehingga tidak terjadi pembuangan data yang tak diperlukan. Jadi, CS adalah suatu metoda untuk melakukan pencuplikan dan sekaligus kompresi sinyal.

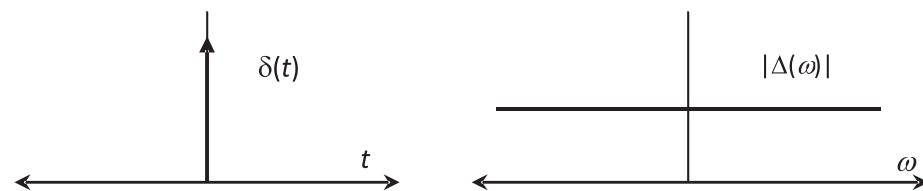
Metoda CS merupakan konvergensi dari perkembangan berbagai metoda pengolahan sinyal, antara lain: wavelet, analisis multiresolusi, representasi basis *overcomplete*, dan optimisasi non-kuadratis. Pada bahasan ini teori CS akan dijelaskan dengan konsep *sparsity* yang diturunkan dari teori ketidakpastian. Dua buah contoh aplikasi CS yang telah berhasil dikembangkan oleh penulis dan tim peneliti di STEI-ITB juga akan dijelaskan.

2. Prinsip Ketidakpastian dan Kompresi Data

2.1 Prinsip Ketidakpastian pada Kawasan Kontinyu

Kompresi data telah menjadi bagian hidup masyarakat luas di abad informasi seperti yang sekarang terjadi. Para pengguna komputer, ponsel, kamera digital, dan berbagai *gadget* elektronik lainnya telah melakukan proses ini tanpa disadari, yaitu ketika melakukan penyimpanan dan pengiriman suara atau citra didalam perangkat elektronik tersebut.

Kompresi data punya kaitan erat dengan suatu konsep yang juga dikenal didalam Fisika, yaitu prinsip ketidakpastian, setelah prinsip ini diperumum. Prinsip ketidakpastian Heisenberg atau HUP (*Heisenberg Uncertainty Principle*) merupakan suatu prinsip yang mendasar. Karena sebuah partikel berperilaku sebagai gelombang, dan demikian pula sebaliknya, maka pengukuran posisi dan momentum suatu partikel tidak mungkin dapat dilakukan teliti sekaligus. Secara matematik prinsip ini bisa dituliskan sebagai $\Delta p \cdot \Delta x \geq \hbar/2$, dengan Δp ketidakpastian momentum, Δx ketidakpastian posisi, dan $\hbar = h/2\pi$ dengan h tetapan Planck.



Gambar 2.3 Pasangan transform Fourier dari sinyal delta Dirac

Selain dinyatakan sebagai hubungan ketidakpastian momentum-posisi, HUP juga dapat dinyatakan sebagai ketidakpastian antara energi ΔE dengan waktu Δt , yaitu $\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar/2$. Karena foton yang memiliki frekuensi f akan memiliki energi sebesar hf , maka HUP untuk energi-waktu akan setara dengan $(\hbar \Delta f) (\Delta t) \geq \hbar/4\pi$ atau $\Delta(2\pi f)(\Delta t) \geq 1/2$. Karena $2\pi f$ adalah frekuensi sudut ω , maka HUP dapat dinyatakan sebagai $\Delta \omega \cdot \Delta t \geq 1/2$. Bentuk terakhir ini dinamakan juga prinsip ketidakpastian Weyl-Heisenberg (WHUP)

Suatu sinyal atau fungsi (waktu) kontinyu tidak mungkin terlokalisasi dengan baik dalam kawasan waktu dan frekuensi secara bersama-sama

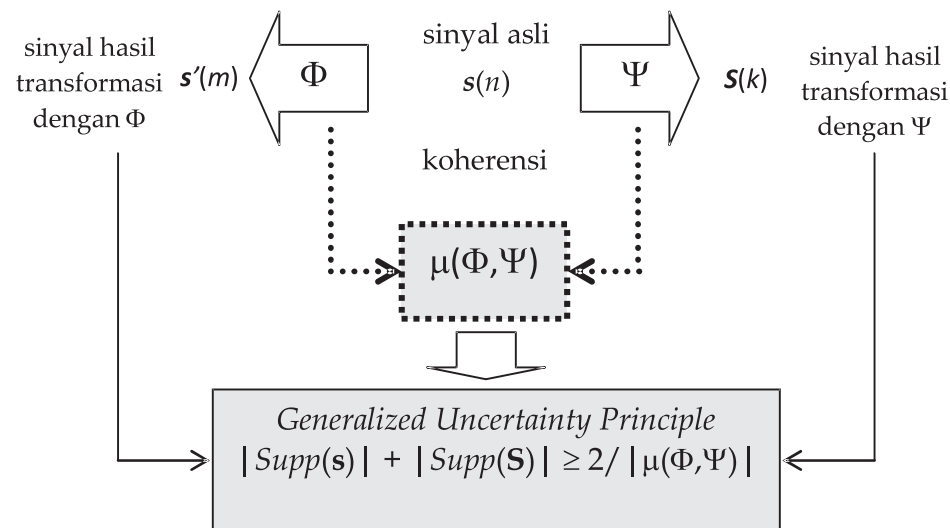
WHUP menyatakan sifat umum dari prinsip ketidakpastian untuk diterapkan ke sebarang sinyal atau fungsi kontinyu (dengan batasan-batasan tertentu). Jika suatu sinyal $s(t)$ terlokalisir dalam kawasan waktu maka transform Fourier dari sinyal ini, $FT[s(t)] = S(\omega)$, akan tersebar dikawasan frekuensi. Demikian pula sebaliknya, suatu sinyal yang terlokalisir dikawasan frekuensi akan memiliki transform Fourier yang tersebar dikawasan waktu. Sifat ini diperlihatkan pada Gambar 2.3 untuk sebuah fungsi delta Dirac dalam kawasan waktu dan pasangan transformnya di kawasan frekuensi.

2.2 Prinsip Ketidakpastian pada Kawasan Diskrit

Derajat lokalisasi suatu sinyal dinyatakan sebagai lebar/luas wilayah dimana sinyal ini memiliki nilai yang tidak nol, atau daerah-dukung (*RoS: Region of Support*) dari fungsi atau sinyal tersebut. Sebagai contoh, fungsi delta Dirac $\delta(t)$ pada Gambar 2.3 hanya memiliki nilai tak nol pada saat $t=0$; dengan demikian RoS-nya adalah satu. Sebaliknya, sinyal sinusoidal $A \sin(\omega t + \phi)$ terbentang ke seluruh kawasan waktu sehingga memiliki RoS di kawasan waktu yang tak berhingga.

Pengertian RoS untuk sinyal (waktu-) diskrit mirip dengan penjelasan diatas, yaitu daerah atau sekumpulan indeks waktu n dimana sinyal diskrit $s(n)$ bernilai tak nol. Untuk sinyal diskrit

sepanjang N cuplikan, *WHUP* menyatakan bahwa penjumlahan *RoS* (*support*) dari sinyal dikawasan waktu dan *RoS* di kawasan frekuensi dibatasi oleh suatu nilai tertentu [14]. Prinsip ini tidak hanya berlaku untuk pasangan sinyal dalam kawasan waktu-frekuensi, tetapi juga pasangan sinyal dibawah transformasi uniter lainnya. Transformasi pada dasarnya adalah perubahan basis dan operasi untuk sinyal diskrit yang dapat dilihat sebagai perkalian antara vektor sinyal dengan matriks transformasi, misalnya Φ .



Gambar 2.4 Diagram keterkaitan transformasi dalam GUP

Suatu matriks transformasi Φ akan berisi vektor-vektor basis lengkap yang membentang ruang vektor. Ini berarti bahwa setiap sinyal dalam kawasan ini dapat dilihat sebagai kombinasi linier dari vektor-vektor basis tersebut. Untuk sepasang basis ortonormal (saling tegak-lurus dan

panjangnya satu) Φ dan Ψ , Elad dan Bruckstein [15] memperkenalkan sebuah prinsip ketidakpastian yang diperumum atau GUP (*Generalized Uncertainty Principle*) $|\Gamma_1| + |\Gamma_2| \geq 2 / \mu(\Phi, \Psi)$, dimana $\mu(\Phi, \Psi) = \max_{\phi \in \Phi, \psi \in \Psi} |\langle \phi, \psi \rangle|$, Γ_1 adalah support dari sinyal dalam basis (kawasan) Φ , sedangkan, Γ_2 adalah support dari sinyal dalam basis (kawasan) Ψ . Besaran $\mu(\Phi, \Psi)$ disebut koherensi (*mutual coherence*) antara kedua basis [15] dan haruslah memenuhi syarat $1/\sqrt{N} \leq \mu(\Phi, \Psi) \leq 1$. Nilai koherensi menggambarkan tingkat keserupaan kedua basis, yakni, nilainya akan kecil jika keduanya berbeda dan akan bernilai satu jika mereka identik. Keterkaitan antar basis dan GUP diperlihatkan pada Gambar 2.4.

3. Formulasi Metode Penginderaan Kompresif

3.1 Representasi Sinyal dengan Kamus Basis

Penggabungan berbagai basis ortogonal menjadi satu buah kamus-basis *overcomplete* dapat membuat dekomposisi sinyal lebih efisien. Peningkatan kinerja kompresi tercapai karena dua hal: (1) tingkat kompresi tinggi karena koefisien yang diambil hanya sedikit, dan (2) sejumlah kecil koefisien tadi cukup untuk merekonstruksi sinyal secara baik. Namun demikian pencarian vektor didalam basis *overcomplete* dengan kriteria cacah koefisien terkecil memerlukan sumberdaya komputasi yang sangat besar. Melalui prinsip ketidakpastian, masalah ini dapat diubah menjadi optimisasi konveks yang lebih mudah dipecahkan, asalkan sinyal bersifat *sparse*.

Tinjau gabungan M buah basis ortogonal $\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_M$ yang masing-masing berukuran $N \times N$ menjadi satu buah basis *overcomplete* $\Phi = \Phi_1 \cup \Phi_2 \cup \dots \cup \Phi_M$. Basis baru Φ , yang juga disebut sebagai *dictionary* (kamus basis), akan memiliki dimensi $N \times (MN)$. Suatu sinyal $\vec{s} = [s_1 \ s_2 \ \dots s_N]^T$ sepanjang N cuplikan dapat dinyatakan dengan berbagai macam kombinasi linier vektor-vektor basis yang ada didalam Φ , bahkan dari masing-masing sistem basis ortogonal Φ_m karena bersifat lengkap, atau semua kombinasi yang mungkin dari Φ_m . Dengan pertimbangan efisiensi yang dituntut oleh kinerja kompresi sinyal, haruslah dipilih kombinasi berbentuk $\vec{s} = \sum_{\gamma} \alpha_{\gamma} \vec{\phi}_{\gamma}$, dimana $\vec{\phi}_{\gamma}$ adalah vektor basis didalam Φ . Syarat kompresi efisien mengharuskan cacah α_{γ} yang sekecil mungkin. Cacah dari α_{γ} dapat dituliskan secara ringkas sebagai $\|\vec{\alpha}\|_0 = \sum_{\gamma} |\alpha_{\gamma}|^0$.

Pencarian basis representasi sinyal $\vec{s}$ didalam Φ dengan cacah terkecil disebut sebagai masalah (P₀) yang dapat dinyatakan sebagai optimisasi [14]:

$$(P_0): \min \|\vec{\alpha}\|_0, \text{ s.t. } \vec{s} = \sum_{\gamma} \alpha_{\gamma} \phi_{\gamma}$$

Mengingat ada sejumlah tak-berhingga solusi dari sistem persamaan linier yang *underdetermined*, apakah nilai minimum ini dapat ditemukan? Untuk pasangan basis waktu-frekuensi, Donoho memberikan batasan supaya pencarian menemukan solusi yang unik dengan menggunakan prinsip ketidakpastian, yakni, jika cuplikan yang

bernilai tak-nol (*support*) dari sinyal di kedua wilayah kurang dari setengah batas prinsip ketidakpastian diatas, maka P₀ akan memiliki solusi yang unik

Meskipun memiliki solusi unik, memecahkan masalah P₀ bukanlah hal yang mudah. Untuk mengatasi hal ini, Chen dan Donoho mengajukan teknik *Basis Pursuit*, yaitu dengan menggantikan P₀ dengan optimisasi P₁ sebagai berikut [16]:

$$(P_1): \min \|\vec{\alpha}\|_1, \text{ s.t. } \vec{s} = \sum_{\gamma} \alpha_{\gamma} \phi_{\gamma}$$

Keberadaan solusi P₁ memerlukan batasan *support* sinyal didalam Φ yang lebih kecil lagi, yaitu kurang dari setengah batas P₀. Sinyal dengan *support* dibawah batas ketentuan P₁ ini disebut sebagai sinyal *sparse* karena dapat dibentuk hanya dari sejumlah kecil vektor basis didalam Φ . Sebuah hasil penting berikut dapat dirumuskan [15], [16]:

Jika sinyal $\vec{s}$ bersifat sparse dalam kawasan waktu-frekuensi, maka dekomposisinya bersifat unik, dan algoritma basis pursuit atau P₁ akan dapat menemukannya.

Bagaimana dengan pasangan basis selain waktu-frekuensi? Sebelumnya telah dijelaskan bahwa prinsip ketidakpastian dikawasan lain telah diperumum oleh Elad dan Bruckstein dengan melibatkan koherensi antara sistem basis Φ_1 dan Φ_2 , yaitu $\mu(\Phi_1, \Phi_2)$, yang secara konsisten akan kembali menjadi WHUP jika kedua basis adalah pasangan waktu-frekuensi. Dasar pemikiran ini dipakai oleh Elad-

Bruckstein [15] maupun Donoho-Huo [14] untuk menghasilkan teorema keunikan dari solusi P_1 yang mengatakan bahwa vektor basis penyusun dari sinyal $\vec{s}$ yang terbentuk dari kombinasi linier vektor-vektor basis didalam Φ dapat ditemukan dengan memecahkan masalah optimisasi (P_1), asalkan banyaknya vektor basis penyusun tersebut kurang dari $\frac{1}{2}(1 + \mu^{-1})$.

3.2 Pencarian Basis Ideal

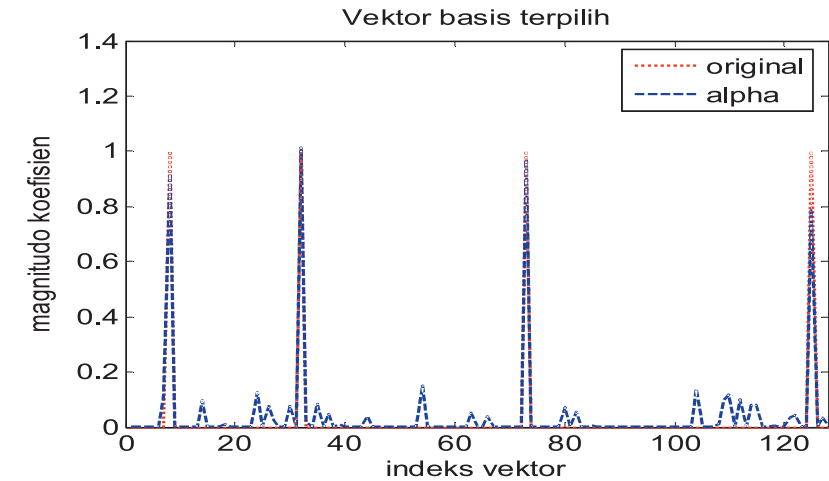
Metoda basis pursuit merumuskan pencarian basis ideal didalam kamus-basis Φ berdimensi $N \times M$ sebagai masalah pemrograman konveks:

$$(P_1): \min \|\vec{\alpha}\|_1 \text{ s.t. } \Phi \vec{\alpha} = \vec{s}$$

Telah diketahui sejak lama bahwa optimisasi non-linier l_1 seperti ini ekuivalen dengan pemrograman linier (LP: *Linear Programming*) [16]

$$\min \vec{c}^T \vec{x} \text{ s.t. } A\vec{x} = \vec{b}, \vec{x} \geq 0$$

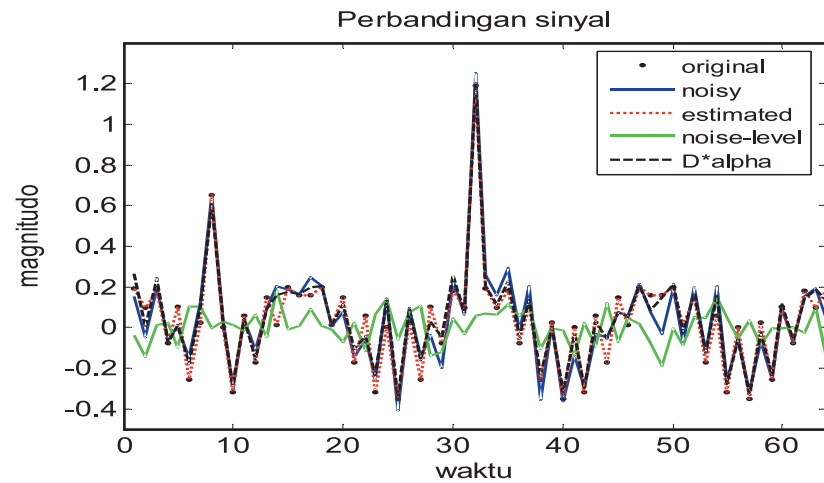
jika dilakukan substitusi $M \Leftrightarrow 2M, \vec{x} \Leftrightarrow (\vec{\alpha}_1, \vec{\alpha}_2); \vec{c} \Leftrightarrow [1 \ 1 \dots 1; 1 \ 1 \dots 1], A \Leftrightarrow [\Phi; -\Phi]$ dan $\vec{b} \Leftrightarrow \vec{s}$. Substitusi ini berarti bahwa kamus-basis di gabung dengan nilai negatif dari kamus tersebut untuk menggantikan peran matriks A , peran dari batas kendala $\vec{b}$ digantikan dengan sinyal $\vec{s}$, panjang vektor solusi dibuat menjadi dua-kalinya, sedangkan fungsi objektif adalah penjumlahan masing-masing koefisien vektor solusi *sparse* $\vec{\alpha}$ dan dimensi kolom diperbesar menjadi duakali-nya.



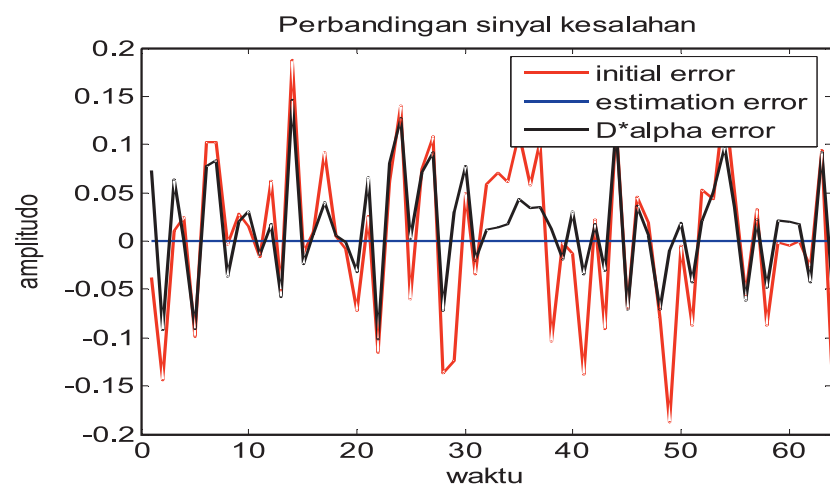
Gambar 2.5 Vektor basis terpilih didalam kamus basis

Cara ini selanjutnya akan dipakai untuk memecahkan contoh masalah dekomposisi sinyal $\vec{s}$ yang terdiri dari dua impuls dan dua vektor basis DCT. Sebagai tambahan, sinyal ini tercampur dengan derau acak Gaussian. Penggabungan pasangan sistem-basis impulse-DCT akan menghasilkan sebuah kamus-basis berukuran 64×128 . Batas *sparsity* Elad-Bruckstein untuk pasangan basis ini bernilai sekitar $0.9\sqrt{N} \approx 7$. Dengan hanya mengambil 4 buah vektor basis penyusun, misalnya vektor pada urutan ke 8, 32, 73, dan 125, haruslah P_1 dapat menemukan solusi eksak-nya.

Gambar 2.5 menunjukkan vektor basis terpilih oleh P_1 yang tepat berhimpit dengan basis penyusun sinyal. Dengan demikian seluruh komponen sinyal telah berhasil ditemukan. Disamping itu, koefisien basis lainnya jauh lebih kecil daripada komponen basis penyusun. Komponen ini biasanya dihilangkan dengan proses *thresholding*.



Gambar 2.6 Sinyal asal dan hasil rekonstruksi



Gambar 2.7 Sinyal kesalahan

Perbandingan sinyal-sinyal hasil pengolahan diperlihatkan didalam Gambar 2.6. Terlihat bahwa sebenarnya tingkat dari sinyal derau cukup tinggi jika dibandingkan dengan sinyal asalnya sehingga menghasilkan distorsi yang signifikan. Namun demikian, karena semua koefisien

berhasil ditemukan, sinyal dapat direkonstruksi secara eksak. Hal ini ditunjukkan pada Gambar 2.7, dimana sinyal kesalahan berharga nol.

3.3 Teorema Pencuplikan Kompresif

Tinjau suatu sinyal $\vec{s}$ sepanjang N -cuplikan yang dinyatakan sebagai vektor kolom berdimensi N . Transformasi sinyal dengan suatu basis ortogonal/uniter berupa matriks Ψ akan mengubah sinyal ini menjadi $\vec{\tilde{S}} = \Psi \cdot \vec{s}$. Dalam hal ini, transform Ψ adalah sebuah matriks berukuran $N \times N$.

Bagi sebagian besar sinyal yang berasal dari hasil pengukuran, akan ada matriks transformasi yang memiliki sifat dekorelasi kuat, yaitu transformasi yang akan membuat sebagian besar koefisien $\vec{\tilde{S}}$ bernilai sangat kecil. Transformasi seperti ini sudah dikenal luas dalam pengolahan sinyal digital, misalnya DFT, DCT, DWT, dst. Saat magnitudo koefisien sinyal dalam kawasan transform-nya diurutkan, akan terlihat bahwa nilainya meluruh dengan cepat. Sinyal yang bersifat demikian disebut sebagai sinyal *sparse* dan transformasi yang mampu bersifat seperti ini disebut sebagai *sparsity transform*.

Proses pengukuran atau pengamatan sinyal dapat dinyatakan sebagai operasi proyeksi oleh matriks Φ , $\hat{\vec{s}} = \Phi \Psi^{-1} \vec{\tilde{S}}$, dimana Φ berukuran $M \times N$ dengan $N \gg M$. Setiap pasangan matriks Φ dan Ψ memiliki koherensi sebesar $\mu(\Phi, \Psi) = \max_{\phi \in P, \psi \in S} |\langle \phi, \psi \rangle|$ dimana P dan S adalah himpunan vektor kolom (atau baris) dari matriks Φ dan Ψ tersebut.

Jumlah cuplikan minimum M yang diperlukan oleh CS untuk merekonstruksi sinyal secara eksak adalah [15], [16], [17], [18]

$$M \geq C \cdot \mu^2(\Phi, \Psi) \cdot K \cdot \log(N)$$

dimana C adalah konstanta, K derajat bebas sinyal atau banyaknya koefisien bernilai tak-nol saat sinyal dinyatakan dalam basis *sparsity*. Untuk jumlah M cuplikan yang memenuhi syarat ini, CS menjamin rekonstruksi eksak dari sinyal dengan melakukan optimisasi

$$\min_{\vec{S}} \|\vec{S}\|_1 \text{ s.t. } \hat{\vec{S}} = \Phi \Psi^{-1} \vec{S},$$

dimana Ψ^{-1} adalah invers dari Ψ . Teorema pencuplikan kompresif (Candes-Tao-Donoho) dapat dinyatakan sebagai berikut

Suatu sinyal K -sparse sepanjang N -cuplikan dapat direkonstruksi secara eksak dari M -buah cuplikan acak, dengan $M \geq c \cdot K \cdot \log(N)$, dimana c suatu konstanta bernilai kecil dan $K \ll M \ll N$

Berbeda dengan pencuplikan klasik, kandungan informasi dari sinyal didalam pencuplikan kompresif tidak lagi ditentukan oleh jumlah komponen frekuensi sinyal, melainkan dari tingkat *sparsity* atau derajat kebebasan K . Efek kompresi terjadi secara dramatis karena sinyal yang semula terdiri dari N cuplikan dapat direkonstruksi dengan cuplikan yang banyaknya hanya sebanding dengan $\log(N)$.

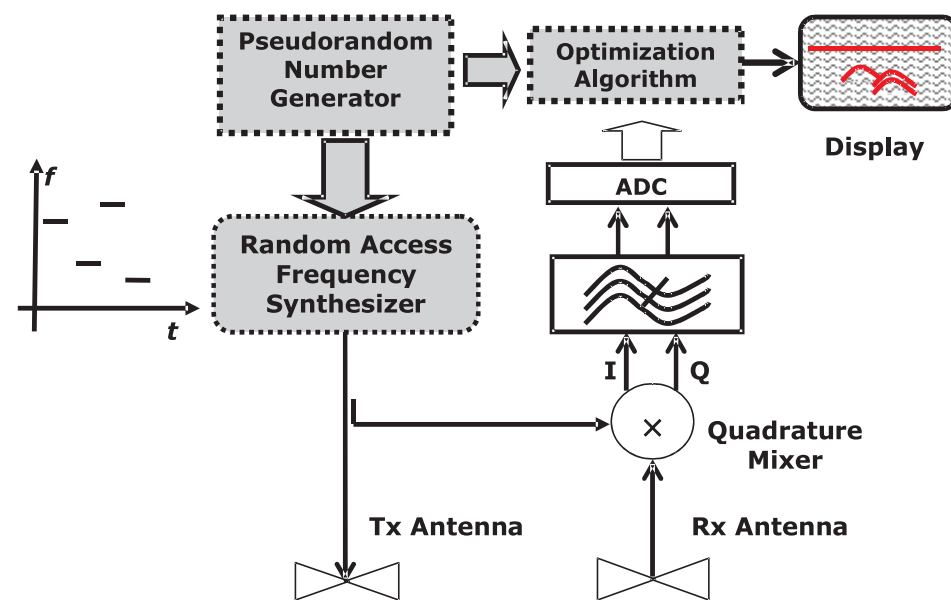
4. Aplikasi dari Penginderaan Kompresif

4.1 Radar Pensintesa Frekuensi Kompresif

Radar penembus permukaan (GPR/*Ground Penetrating Radar*) adalah suatu alat pencitra gelombang elektromagnetik (EM) yang mampu melihat benda-benda di bawah permukaan tanah. Desain GPR sangat bergantung pada tujuan aplikasi; GPR untuk mencitra benda dibawah permukaan-dalam (mis. air) akan berbeda dengan yang akan dipakai untuk melihat benda di permukaan-dangkal (mis. ranjau). Disamping itu, kebutuhan tingkat resolusi juga akan menentukan persyaratan desain dari radar.

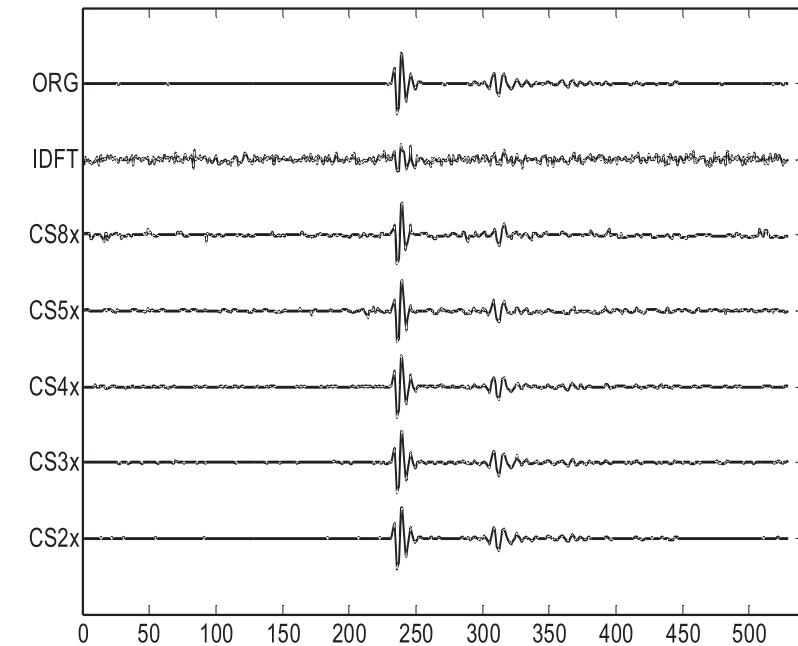
Secara prinsipil ada dua macam teknologi pancaran radiasi EM yang bisa dipakai untuk membuat radar, yaitu pancaran impuls dan pancaran gelombang kontinyu. Untuk kepentingan praktis tertentu yang memerlukan resolusi tinggi, durasi impuls (efektif) yang diperlukan haruslah sangat singkat (dalam orde *sub-nano* detik). Sumber impuls yang demikian sangat sulit ditemukan, sangat mahal, memerlukan rangkaian RF yang tidak sederhana, dan perlu penguat daya yang sulit dicari di pasaran. Masalah ini dapat diatasi dengan teknik SFCW (*Stepped-Frequency Continuous Wave*), meskipun akan meningkatkan waktu akuisisi data dan pengolahan sinyal. Inilah salah satu alasan mengapa sistem radar SFCW kurang berkembang. Berbagai upaya telah dilakukan untuk mengatasi masalah ini, misalnya dengan mengirimkan beberapa tone frekuensi sekaligus secara serempak [19].

Munculnya teknik pencitraan kompresif memungkinkan masalah ini dapat diatasi dengan pendekatan yang berbeda dari sebelumnya, sehingga menjadi sebuah radar kompresif.



Gambar 2.8 Blok diagram dari SFCW-GPR Kompresif [20], [21]

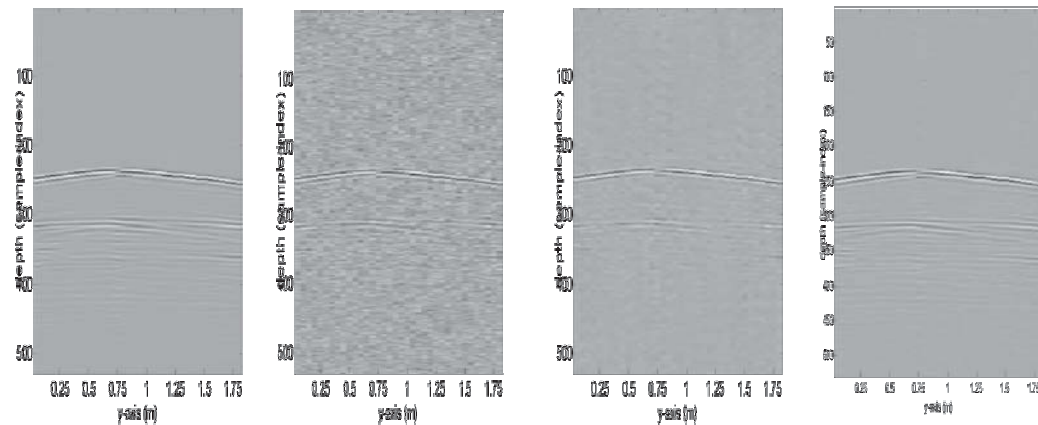
Pada prinsipnya, radar kompresif ini melakukan pencuplikan sejumlah kecil frekuensi secara acak dan kemudian menerapkan prinsip penginderaan kompresif untuk merekonstruksi sinyal. Dengan demikian, perlu adanya perangkat tambahan berupa pembangkit bilangan acak dan pengolah sinyal yang berdasarkan pemrograman matematika. Disamping itu, pembangkit frekuensi harus memiliki kemampuan membangkitkan *tone* frekuensi secara acak. Gambar 2.8 memperlihatkan rancangan sistem yang dimaksud [20], [21].



Gambar 2.9 Perbandingan hasil rekonstruksi sinyal dengan IDFT dan CS untuk berbagai tingkat kompresi [20], [21]

Radar kompresif ini dapat disimulasikan dengan sebuah *Network Analyzer* (NA). Perbandingan hasil pengolahan sinyal dari jumlah cuplikan yang sama, dengan teknik konvensional IDFT dan teknik penginderaan kompresif diperlihatkan pada Gambar 2.9. Pada gambar tersebut terlihat bahwa hasil rekonstruksi dengan penginderaan kompresif jauh lebih baik daripada IDFT, hal ini tentu akan mempengaruhi kinerja radar yang dibuat. Pada gambar, sinyal dengan label "ORG" merupakan sinyal hasil rekonstruksi dengan memakai seluruh cuplikan, label "IDFT" menyatakan rekonstruksi dengan inverse DFT dari 1/8 cuplikan acak, sedangkan "CS8x", sampai, "CS2x"

menyatakan rekonstruksi dengan metoda penginderaan kompresif berdasarkan $1/8$ buah cuplikan sampai dengan $1/2$ banyaknya cuplikan asalnya.



Gambar 2.10 Perbandingan hasil rekonstruksi *B-scan* [20], [21]

Sekumpulan *A-scan* yang diambil dari pengamatan berurutan dalam suatu baris tertentu akan membentuk citra *B-Scan*. Perbandingan citra *B-scan* pada Gambar 2.10 memperlihatkan efek perbaikan kualitas secara lebih jelas lagi. Lengkungan hiperbola pada rekonstruksi IDFT terkotori oleh cacat akibat cuplikan tak lengkap, sedangkan rekonstruksi dengan CS memberikan hasil yang jauh lebih baik. Citra *B-scan* untuk cuplikan $1/2$ dari semula memberikan hasil yang hampir sempurna seperti pada citra asal dengan cuplikan penuh. Hal ini memperlihatkan kemungkinan implementasi radar kompresif dengan kecepatan tinggi dan hasil rekonstruksi citra yang baik.



Gambar 2.11 Realisasi radar SFCW kompresif pada frekuensi 700-1400 MHz:
(a) Prototip dan (b) Saat beroperasi

Rancangan dari radar kompresif tersebut telah diajukan oleh tim peneliti dari STEI-ITB/IRCTR-IB pada tahun 2008 dan disampaikan pada konferensi radar internasional di Birmingham, UK [21]. Setahun kemudian, sebuah prototip radar kompresif yang bekerja pada frekuensi 700-1400 MHz juga berhasil direalisasikan. Gambar 2.11 memperlihatkan foto dari prototip radar SFCW kompresif dan demonstrasi ketika radar tersebut dioperasikan sebagai radar penembus dinding.

4.2 Teleskop Radio Interferometri Kompresif

Resolusi dari sebuah pengindera (sensor) berhubungan langsung dengan ukuran apertur-nya. Pada beberapa kasus, peningkatan ukuran apertur tidak bisa dilakukan karena pertimbangan praktis. Masalah ini terjadi ketika apertur sebuah teleskop radio ingin diperbesar hingga

sebanding dengan apertur teleskop optik. Karena pengamatan pada teleskop radio dilakukan pada panjang gelombang milimeter, sentimeter, atau bahkan meter, perlu sebuah antena berukuran beberapa kilometer untuk bisa menyamai resolusi dari sebuah teleskop optik.

Solusi dari permasalahan apertur tersebut adalah dengan menggunakan teknik pencitraan sintesis (*synthesis imaging*), dimana suatu apertur berukuran sangat besar dapat diperoleh secara tidak langsung dengan mensintesis sejumlah apertur kecil setelah proses akuisisi data selesai dilakukan. Teknik ini telah berhasil diterapkan didalam sistem teleskop radio interferometri (VLBI/*Very Long Base Line Interferometry*). Namun demikian, pencuplikan spasial didalam VLBI tidak dapat dilakukan secara menyeluruh. Ketidaklengkapan cuplikan dalam bidang Fourier (*uv-plane*) menghasilkan cacat pada citra rekonstruksi, sehingga, seolah-olah citra ini merupakan konvolusi antara citra asli dengan impuls-impuls yang tersebar di seluruh bidang spasial.

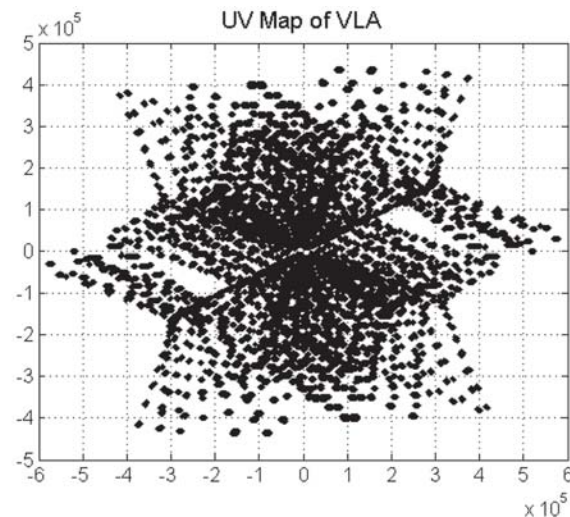
Distorsi dari citra hasil rekonstruksi dapat dikurangi dengan proses dekonvolusi, misalnya dengan menggunakan algoritma CLEAN atau algoritma entropi minimum (MEM-*Minimum Entropy Method*). Sebuah metoda baru dalam melakukan dekonvolusi atau merekonstruksi citra berdasarkan penginderaan kompresif dapat diajukan sebagai solusi. Sifat CS yang mampu merekonstruksi suatu sinyal berdasarkan cuplikan tak-lengkapannya sangat cocok untuk diterapkan pada kasus pencitraan sintesis.

Untuk melakukan dekonvolusi atau rekonstruksi, beberapa informasi awal (*prior information*) dari citra harus diketahui. Algoritma CLEAN maupun algoritma MEM memakai asumsi-asumsi berikut ini sebagai *prior* [22]:

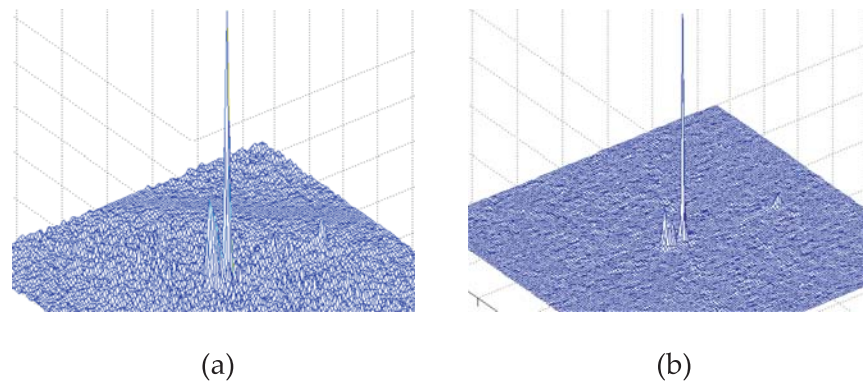
1. *Support* dari benda langit pemancar radio bersifat terbatas: emisi gelombang radio diketahui atau diasumsikan bernilai tak-nol hanya pada daerah tertentu yang luasnya terbatas
2. Langit merupakan sekumpulan sumber radiasi berbentuk titik
3. Langit bersifat licin (*smooth*)

Ketiga *prior* tersebut diatas menunjukkan sifat *sparse* dari citra interferometri radio. Dengan demikian, ada kemungkinan bahwa metoda CS dapat dipakai untuk membuat sebuah algoritma rekonstruksi baru dengan hasil yang lebih baik daripada algoritma-algoritma yang sudah ada.

Pengukuran VLBI yang sebenarnya tidaklah dilakukan secara acak. Jika koordinat pengamat dan posisi objek diketahui, lokasi dari titik cuplikan pada waktu tertentu akan dapat ditentukan secara tepat. Berikut ini hasil percobaan yang menunjukkan kinerja kuantitatif dari rekonstruksi CS dalam kondisi pencuplikan tidak dilakukan secara acak sempurna [23]. Data pengamatan yang dipakai berasal dari stasiun pengamat VLA (*Very Large Array*), yang berlokasi di Socorro, New Mexico, USA. Objek yang diamati merupakan sebuah galaksi radio aktif 3C459, sedangkan pengamatan dilakukan pada panjang gelombang 4885 MHz.



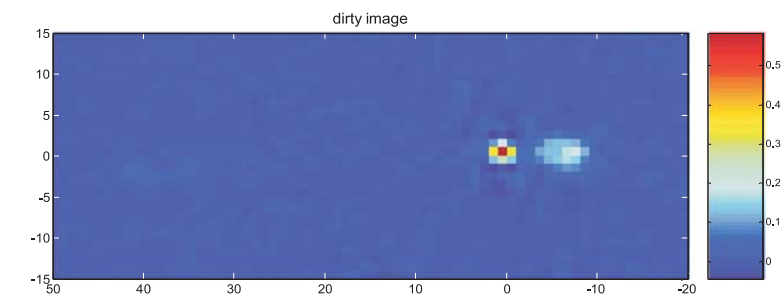
Gambar 2.12 Peta UV yang dihasilkan VLA



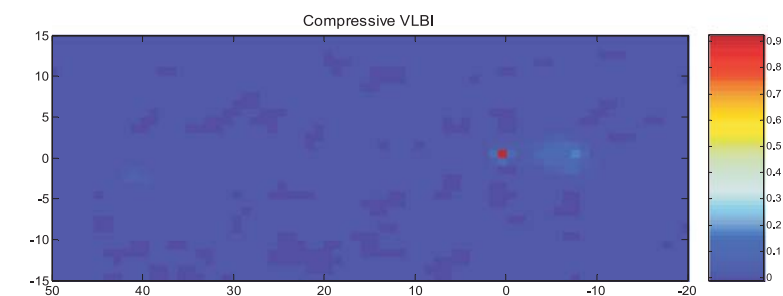
Gambar 2.13 Pandangan 3 dimensi dari citra yang direkonstruksi:
(a) *dirty map* dan (b) rekonstruksi CS

Gambar 2.12 menunjukkan peta *UV* yang menggambarkan sebaran titik cuplikan dalam bidang frekuensi spasial. Untuk menghemat perhitungan, data ini dicuplik ulang sehingga menjadi sebuah *grid* berukuran 128×128 . Gambar 2.13 menunjukkan pandangan 3D dari (a) *dirty map* dan (b) hasil rekonstruksi dengan metoda CS. Pengamatan

pada gambar (a) menunjukkan munculnya cacat berupa permukaan-permukaan kasar disekitar puncak intensitas. Sebaliknya, citra yang dibentuk oleh metoda CS lebih halus dan puncaknya lebih menonjol.



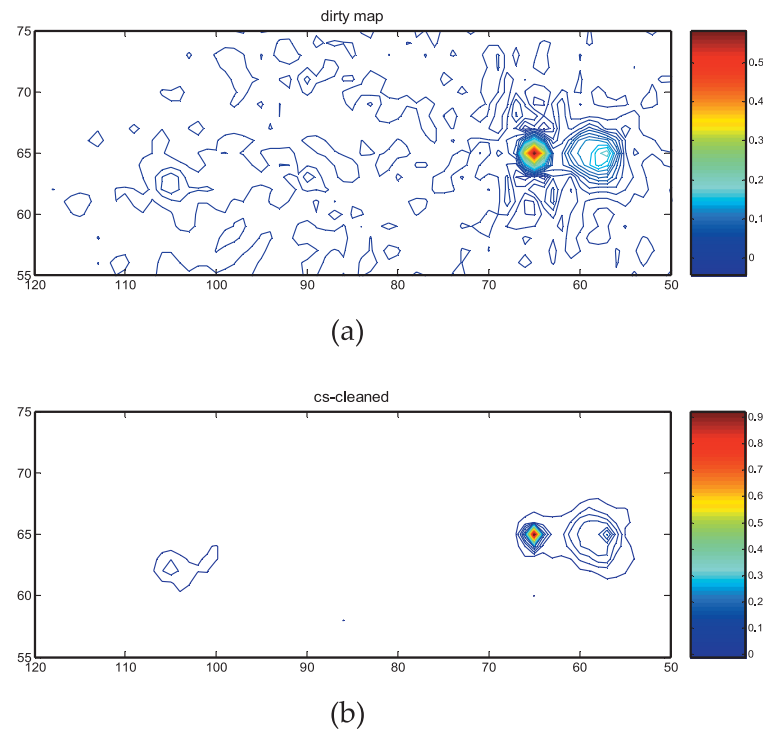
(a)



(b)

Gambar 2.14 Citra rekonstruksi di wilayah tertentu:
(a) *dirty map* dan (b) hasil rekonstruksi CS

Gambar 2.14 menunjukkan citra rekonstruksi disekitar wilayah tertentu yang menjadi perhatian, dimana (a) *dirty map* dan (b) citra bersih hasil rekonstruksi CS, sedangkan Gambar 2.15 menunjukkan peta kontur-nya.



Gambar 2.15 Peta kontur dari citra sebelumnya:
(a) *dirty map* and (b) hasil rekonstruksi CS

Hasil-hasil eksperimen ini menunjukkan algoritma yang diajukan untuk merekonstruksi citra VLBI menggunakan metoda CS telah dapat bekerja dengan baik. Meskipun dalam pendekatan konvensional pengolahan ini tergolong dalam proses dekonvolusi, sesungguhnya CS lebih dekat pada proses rekonstruksi. Oleh karena itu, CS dapat dipakai untuk merumuskan sistem pencitraan interferometri radio yang lebih sesuai dengan sifat tak-lengkap dari cuplikan.

PENUTUP

Pengolahan sinyal dan penginderaan sudah menjadi bagian penting yang tidak bisa terlepas dari kehidupan manusia modern. Kebutuhan pada kedua bidang ini akan semakin meningkat, seiring dengan peningkatan kebutuhan manusia pada informasi.

Pemahaman yang lebih mendasar dari sifat sinyal dan proses penginderaan akan memunculkan paradigma baru yang mampu meningkatkan efisiensi dari pengolahan, penyimpanan, dan pengiriman sinyal. Berbagai metoda dan algoritma baru akan muncul sebagai pilihan atau bahkan sebagai pengganti metoda lama. Ini adalah hal yang wajar dalam perkembangan ilmu pengetahuan. Oleh karena itu, dunia pendidikan tinggi dan lembaga penelitian harus selalu mengikuti perkembangan terkini dari bidang ini.

Pengolahan sinyal kompleks dan penginderaan kompresif adalah contoh nyata dari fenomena diatas. Paparan didalam buku ini merupakan catatan dari sebuah upaya untuk mengikuti perkembangan terkini dari dunia pengolahan sinyal dan penginderaan, dan usaha untuk menerapkannya dalam kehidupan sehari-hari. Hasil yang telah dicapai barulah suatu langkah awal. Usaha ini perlu diteruskan secara sistematis dan berkelanjutan.

UCAPAN TERIMAKASIH

Pertama-tama, perkenalkan kami mengucapkan terimakasih yang sebesar-besarnya kepada pimpinan dan seluruh anggota Majelis Guru Besar ITB, atas kesempatan untuk menyampaikan pidato ilmiah di hadapan sidang yang terhormat ini.

Ucapan terimakasih kami sampaikan kepada orangtua kami, *Ibunda Sutarti* dan *(Alm.) Ayahanda Darmono*, yang telah melahirkan dan mengasuh kami dengan penuh kasih sayang. Semoga Allah swt selalu menyayangi beliau berdua di dunia dan akhirat, sebagaimana mereka telah menyayangi kami sewaktu kecil.

Ucapan terimakasih yang tak terkira untuk istri tercinta *Arifa Kusumawati*, yang telah sabar dan setia mendampingi dalam menjalani hidup, dalam suka maupun duka; dan telah memberikan anak yang lucu-lucu: *Almer, Alvin*, dan *Almeira*. Terimakasih juga kepada mertua kami, *Ibu Sri Anita* dan *Bpk Soerono*, yang telah sabar memberikan nasehat kepada kami dan telaten dalam menghadapi cucunya yang nakal-nakal. Saudara kandung penulis--*Mas Bram, Dhodhy, Hanes*, dan *Dinar*, telah setia menemani dan tumbuh bersama, terimakasih, semoga semuanya mendapatkan kebahagiaan di dunia dan akhirat kelak.

Ucapan terimakasih yang sebesar-besarnya kami sampaikan kepada seluruh guru kami di SDN Kaibon 2, SMPN 2 Madiun, SMAN 3 Madiun, Institut Teknologi Bandung, dan Universitas Tokyo; khususnya kepada

Prof. Akira Hirose yang telah membimbing kami dengan penuh kesabaran menjadi seorang peneliti, kepada *Prof. Tati Mengko*, dan *Bp. Ir. Utoro Sastrokusumo* yang selalu bersedia menjadi tempat mengadu ketika menemui berbagai masalah dalam menjalani kehidupan akademik di ITB. Semoga Allah swt selalu melimpahkan kebahagiaan, kesehatan, dan balasan bagi semua amal baik beliau.

Kami mendapatkan kepercayaan mengemban amanah mulia menjadi Guru Besar di ITB karena dukungan dari berbagai pihak: Dekan STEI *Prof. Adang S. Ahmad*, Senat Akademik ITB, Para Guru Besar di STEI dan ITB; khususnya *Prof. Tati Mengko*, *Prof. Carmadi Machbub*, dan *Prof. Hendra Gunawan*, yang telah bersedia memberikan rekomendasi. Anggota milis-dosen memiliki peran besar dalam mendorong kelancaran kenaikan jabatan. Perkenalkan kami mengucapkan terimakasih sebesar-besarnya kepada beliau semua; khususnya kepada *Dr. Budi Rahardjo*, *Dr. Armein Langi*, *Dr. Eniman Y. Syamsuddin*, *Dr. Isnuwardianto*, dan *Prof. Satryo Sumantri Brodjonegoro*, yang telah memberi semangat dan membuka peluang ketika semua pintu hampir tertutup. Terimakasih juga kami sampaikan kepada pemerintah Republik Indonesia yang telah memberikan kepercayaan jabatan ini kepada kami. Semoga budi baik beliau semua mendapatkan balasan dari Allah swt.

Ucapan terimakasih secara khusus kami sampaikan kepada semua dosen anggota KK Teknik Telekomunikasi yang telah membentuk kami menjadi pribadi yang tangguh selama bekerja di ITB. Semoga Bp/Ibu

semua diberikan kelancaran dalam berkarir.

Para mahasiswa telah memberi warna dalam kehidupan kami sebagai peneliti. Pada kesempatan ini kami mengucapkan terimakasih kepada semua mahasiswa penghuni Lab Radar, Lab Biomedika, dan IRCTR-IB; khususnya kepada *Donny, Tony, Mas Tjandra, Pak Koes, Tommi, Agung, dan Astri*. Semoga semuanya diberi kelancaran studi dan tercapai cita-citanya.

Sebagai kata akhir, perkenalkan kami juga menyebut nama-nama berikut dalam daftar ucapan terimakasih: *Dr. Suhartono Tjondronegoro, Dr. Sugihartono, Prof. Soegijardjo Soegijoko, Prof. Ketut Karsa, Dr. Suwarno, Dr. Hendrawan, Dr. Adit Kurniawan, Prof. Leo P. Ligthart, Dr. Andaya Lestari, Dr. Taufiq Hidayat, Dr. Tatatjipta Dirgantara, Assoc. Prof. Dr. Josaphat Tetuko*, dan kepada semua pihak yang tidak bisa disebutkan satu-persatu. Terimakasih yang sebesar-besarnya atas kerjasama kita selama ini.

DAFTAR PUSTAKA

1. R.W. Lucky, "Math Blues," *IEEE Spectrum*, September 2007.
2. A. V. Oppenheim and J. S. Lim, "The Importance of Phase in Signals," *Proceedings of the IEEE*, vol 69, No. 5, pp. 529-541, May 1981.
3. A.B. Suksmono, "Signal Representation and the Nonlinear Property of Phase Images," *IEEE Geosc. & Rem. Sensing Letters*, Vol.4, No.4, pp.606-610, Oct. 2007.
4. B. Widrow, J.J. McCool, and M. Ball. "The complex LMS algorithm", *Proceeding of the IEEE*, pp. 719-720, April 1975.

5. A. Hirose Ed., *Complex-Valued Neural Networks – Theories and Applications*, Series on Innovative Intelligence, Vol. 5, World Scientific, 2003.
6. Hirose, *Complex-Valued Neural Networks*, in *Studies in Computational Intelligence* 32, Springer, 2006.
7. A.B. Suksmono and A. Hirose, "Adaptive complex-amplitude texture classifier that deals with both height and reflectance for interferometric SAR images", *IEICE Trans. on Electronics*, ISSN 0916-8524, Vol. E83-C, no. 12, pp. 1912-1916, Dec. 2000.
8. A.B. Suksmono and A. Hirose, "Adaptive noise reduction of InSAR image based on Complex-MRF model and its application to phase unwrapping problem", *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 40, No. 3, pp. 699-709, March 2002.
9. A.B. Suksmono and A. Hirose, "Interferometric SAR image restoration using Monte-Carlo Metropolis method", *IEEE Trans. on Signal Processing*, Vol. 50, No.2, pp. 290-298, Feb. 2002.
10. A.B. Suksmono and A. Hirose, "Beamforming of Ultra-Wideband Pulses by A Complex-Valued Spatio-Temporal Multilayer Neural Networks" *Int. Journal of Neural Systems*, Vol. 15, No. 1&2, pp. 85-92, April 2005.
11. K. Huang, *Statistical Mechanics*, Wiley, 2nd Edition.
12. A.B. Suksmono and A. Hirose, "Progressive Transform-Based Phase Unwrapping Utilizing a Recursive Structure" *IEICE Trans. on Communications*, pp.929-936, 2006.
13. A.V. Oppenheim & R.W. Schafer, *Discrete Time Signal Processing*, Prentice Hall Signal Processing.
14. D.L. Donoho & X. Huo, *Uncertainty Principles and Ideal Atomic*

Decomposition, Tech. Report, Stanford University.

15. M.Elad and A.M. Bruckstein, "A generalized uncertainty principle and sparse representation in pairs of bases", *IEEE Trans. on Information Theory*, Vol. 48, pp. 2558-2567, September 2002.
16. S.S. Chen, D. Donoho, and MA Saunders, "Atomic decomposition by basis pursuit," *SIAM J. on Sci. Computing*, 20(1):33-61, 1999.
17. D.L. Donoho & P.B. Stark, "Uncertainty principles and signal recovery", *SIAM J. on Applied Math.*, 49(3):906-31, 1989.
18. E.J. Candes and M.B. Wakin, "An introduction to compressive sampling," *IEEE Sig. Processing Mag.*, Vol.25, no.2, pp.21-30, Mar.2008.
19. P. van Genderen, P. Hakkaart, J. van Heijenoort, and G.P. Hermans, "A multifrequency radar for detecting landmines: design aspects and electrical performance," in *Proc. 31st Eur. Microwave Conf.*, 2001, vol. 2, pp. 249–252.
20. A.B. Suksmono, E. Bharata, A.A. Lestari, A. Yarovoy, and LP. Ligthart, "Compressive Stepped-Frequency Continuous Wave Ground Penetrating Radar," *IEEE Geosc. and Remote Sensing Letters*, 2010, (accepted).
21. A.B. Suksmono, E. Bharata, A.A. Lestari, A. Yarovoy, and LP. Ligthart, "A compressive SFCW-GPR System," *The 12th Intl. Conf. on Ground Penet. Radar*, June 16-19, 2008, Birmingham, UK.
22. T. Cornwell, "Chapter 3: Imaging Concepts," *VLBI & VLBA, ASP Conf. Series*, vol. 82, pp. 39-56, 1995.
23. A.B. Suksmono, "Deconvolution of VLBI Images Based on Compressive Sensing", *Proc. of ICEEI 2009*, pp. 110-116.

CURRICULUM VITAE



Nama : **ANDRIYAN BAYU SUKSMONO**
Tempat, tgl lahir : Madiun, 5 Juli 1966
Nama Istri : Arifa Kusumawati
Nama Anak : 1. Almer Fandriyanto
2. Alvin Fandriyanto
3. Almeira Adzra Fandriyanto

Alamat Kantor : Sekolah Teknik Elektro dan Informatika
Institut Teknologi Bandung,
Jl. Ganesha No.10, Bandung
Telp: +62-22-2501661

E-mail : suksmono@stei.itb.ac.id; suksmono@yahoo.co.id

1. RIWAYAT PENDIDIKAN:

- SD Negeri Kaibon 2, Kabupaten Madiun, 1979
- SMP Negeri 2, Kodya Madiun, 1982
- SMA Negeri 3, Kodya Madiun, 1985
- Sarjana Fisika, FMIPA-ITB, 1990
- Magister Teknik Elektro, FTI-ITB, 1996
- Doctor of Philosophy, Fac. of Engineering, Tokyo University, 2002

2. RIWAYAT KERJA DI ITB (terpilih):

- Koordinator Penelitian, STEI-ITB, 2005-2009
- Anggota Komisi Penelitian, LPPM-ITB, 2006-2009

- Kepala Divisi Riset, PPTIK-ITB, 2006–2008
- Ketua KK T.Telekomunikasi, STEI-ITB, 2008-sekarang

3. RIWAYAT JABATAN FUNGSIONAL DI ITB:

- Asisten Ahli Madya/Asisten Ahli (*Instructor*), 1998-2005
- Lektor Kepala (*Associate Professor*), 2005-2009
- Guru Besar (*Professor*), 2009-sekarang

4. PENGAKUAN DAN PENGHARGAAN (terpilih):

- *The APPNA Award for Theoretical Development*, (untuk formulasi metoda UWB Neuro-Beamforming), 2004
- Peringkat I, Dosen Berprestasi ITB, Juni 2007
- Peringkat I, Dosen Berprestasi Nasional, Agustus 2007
- *Elevated to Senior Member of the IEEE*, December 2007

5. RIWAYAT DALAM ORGANISASI PROFESI/MASYARAKAT KEILMUAN:

5.1 Keanggotaan (terpilih):

- Senior Member IEEE (*Institute of Electrical & Electronic Engineers*)
- Profesional Member ACM (*Association for Computing Machinery*)

5.2 Kegiatan (terpilih):

- Editorial Board/Assoc. Editor: *ITB Journal on ICT*, *J. Telecom Research & Devlp. (IT Telkom)*, *J. Elektronika & Telekom. (LIPI)*; *IJEHMC (IGIPub.)*
- Senior Editor/Co-Editor/Assoc. Editor: *IJEEI (STEI-ITB)*; *JETA (APT-Tokai Univ. Med. Sci.)*

- *Vice Rapporteur, ITU, SG.2 Q.14*
- Member of Sci./Tech./Intl - Prog. Committee: *IEEE-MAN/ICC-2009, 2010; IEEE-IJCNN 08 & IEEE-FUZZ 08, ICICI-BME 2009, I-CENTRIC-2008; MoMM-2004; APT Workshop & ITU Meeting (2002-2007); HEALTHCOM-2004 & 2005;*
- Chair of Scientific/Intl- Committee: *rICT-2007, rICT-2009; ICEEI-2007*
- Steering Committee: *TSSA 2009, Sem. Radar Nas 2007-2010*
- Conference Chair: *TSSA 2006.*
- Keynote Speaker: *TSSA 2005; rICT 2009*
- Reviewer in Journals: *IEEE Trans. Image Processing, IEEE Sig. Proc. Letters, IEEE Trans. Geosc. & Rem. Sens., IEEE GRS Letters; Springer J. Comp.&Viz. Sci., Elsevier J. Comp & Elec. Eng.*

6. PUBLIKASI ILMIAH (terpilih dari > 140 makalah):

- **A.B. Suksmono**, E. Bharata, AA Lestari, A. Yarovoy, and LP Ligthart, "Compressive Stepped-Frequency Continuous Wave Ground Penetrating Radar," *IEEE Geosc. Rem. Sensing Letters*, 2010, (*accepted*).
- A.A. Lestari, E.Bharata, **A.B. Suksmono**, A. Kurniawan, A.G. Yarovoy, L.P. Ligthart, "A Modified Bow-Tie Antenna for Improved Pulse Radiation" *IEEE Trans. on Antena & Propagation*, 2010 (*accepted*).
- K. Adi, **A.B. Suksmono**, TLR Mengko, H. Gunawan, "Phase Unwrapping by Markov Chain Monte Carlo Energy Minimization," *IEEE Geosc. Rem. Sensing Letters*, 2010, (*accepted*).
- A.A. Pramudita, A. Kurniawan, **A.B. Suksmono**, and A.A. Lestari

"Effect of Antenna Dimension on Its Footprint In GPR Application," *IET Microwaves, Antennas, & Propagation*, 3(8), pp.1271-1278, pp.606-610, 2009.

- **A.B. Suksmono**, "Signal Representation and The Non-Linear Property of Phase Images," *IEEE Geosc. Rem. Sensing Letters*, Vol.4., No.4, October 2007.
- **A.B. Suksmono** and A. Hirose, "Progressive Transform-Based Phase Unwrapping Utilizing a Recursive Structure" *IEICE Trans. on Communications*, E89-B(3), pp.929-936, 2006.
- **A.B. Suksmono** and A. Hirose, "Fractal Estimation Method to Reduce the Distortion in Phase Unwrapping Process," *IEICE Trans. on Communications*, Vol. E88-B, No.1, pp.364-371, January, 2005.
- **A.B. Suksmono** and A. Hirose, "Beamforming of Ultra-Wideband Pulses by A Complex-Valued Spatio-Temporal Multilayer Neural Networks" *Int. Journal of Neural Systems*, Vol. 15, No. 1&2, pp.85-91, April 2005.
- **A.B. Suksmono** and A. Hirose, "Intelligent beamforming using a complex- valued neural network," *Intl. Journal of Fuzzy and Intelligent Systems*, 15 (3-4), pp.139-147, 2004.
- **A.B. Suksmono** and A. Hirose, "Adaptive noise reduction of InSAR image based on Complex-MRF model and its application to phase unwrapping problem", *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 40, No.3, pp. 699-709, March 2002.
- **A.B. Suksmono** and A. Hirose, "Interferometric SAR image restoration using Monte-Carlo Metropolis method", *IEEE*

Transaction on Signal Processing, Vol. 50, No.2, pp. 290-298, Feb. 2002.

- **A.B. Suksmono** and A. Hirose, "Adaptive complex-amplitude texture classifier that deals with both height and reflectance for interferometric SAR images", *IEICE Transaction on Electronics*, ISSN 0916-8524, Vol. E83-C, no. 12, pp. 1912-1916, Dec. 2000.

7. KEGIATAN PENELITIAN DAN LAIN-LAIN (terpilih):

- Hibah Riset International:
 - ITB-2010(PI): *Compressive Holography Imaging*
 - ITB-2009(PI): *High Speed SFCW-GPR Imaging System with Improved Processing Scheme*
 - HRIA-2009 (PI): *Sparse Deconvolution of Interferometric Radio Images*
 - HRIA-2008(PI): *Application of Compressive Sensing in Signal Processing, Imaging, and Communications*
- Riset Insentif KNRT/RISTEK 2010 (PI): *Pengembangan Radar Penembus Permukaan Berkecepatan Tinggi untuk Aplikasi HANKAM*
- Scholarships/Fellowships: *Monbusho* (1999-2002); *RCAST-Scholarships* (1999-2000); *IEEE Travel Grant Award (APCCAS'98)*, *Hitachi Research Fellowship* (2009), *JSPS Fellowship* (1997)

