PHASE UNWRAPPING CITRA InSAR MENGGUNAKAN PENDEKATAN MINIMISASI ENERGI LOKAL

Kusworo Adi[1,2], Tati L.R. Mengko[1], Andriyan B. Suksmono[1], dan H. Gunawan[3]

1. Sekolah Teknik Elektro dan Informatika, Institut Teknologi Bandung, Bandung 40132, Indonesia.
2. Jurusan Fisika, FMIPA, Universitas Diponegoro, Tembalang, Semarang 50239, Indonesia
3. Departemen Matematika, FMIPA, Institut Teknologi Bandung, Bandung 40132, Indonesia.

E-mail: kusworoadi@yahoo.com

Abstrak

Proses rekonstruksi data fasa dari bentuk tutupannya disebut *Phase Unwrapping* (PU). Secara ideal, tanpa adanya derau fasa, singularitas, dan masalah *aliasing*, informasi fasa dapat di-*unwrap* secara mudah. Namun kenyataannya, data fasa sebenarnya selalu mengalami gangguan derau dan diskontinuitas. Proses PU menjadi lebih rumit dan membutuhkan algoritma PU yang lebih sesuai untuk mengatasi masalah yang muncul. Untuk itu pada penelitian ini dikembangkan suatu algoritma PU lokal dengan menggunakan pendekatan minimisasi energi piksel-piksel yang bertetanggaan pada orde 1. Pada metode ini dihitung selisih energi dari empat piksel yang bertetanggaan, kemudian dihitung nilai probabilitas untuk mendapatkan jumlah lipatannya. Dari hasil pengujian menggunakan citra sintesis dan InSAR dengan koherensi 0,8 didapatkan nilai *Peak Signal to Noise Ratio* (PSNR) 30,5373 dB pada 20 iterasi.

Abstract

Phase Unwrapping InSAR Image Using Local Energy Minimization Approach. Reconstruction process of phase data from its cover is called Phase Unwrapping (PU). Ideally, without any noise phrase, singularity, and aliasing problems, the phase information can be unwrapped easily. However, in fact, the phase data actually always get noise disturbance and discontinuity. The PU process becomes more complicated and needs a better PU algorithm to address the problems properly. In this research, the local PU algorithm is developed using minimization of close related first-order pixels energy approach. In this method, the energy difference between four close related pixels is counted, followed by getting the probability value to obtain its total multiple ranges. Based on the research using synthesis ring image and InSAR with coherence 0.8, the *Peak Signal to Noise Ratio* (PNSR) range will be 30.5373 dB in 20 itteration.

Keywords: phase unwrapping, energy minimization

1. Pendahuluan

Derau acak pada citra kompleks adalah musuh besar dalam proses restorasi citra. Derau dapat menggangu seorang dokter dalam melakukan diagnosis pada citra medik. Selain itu derau pada citra satelit yang diakibatkan oleh proses transmisi data akan mempengaruhi dalam interpretasi data oleh seorang ahli. Oleh karena ini sangat penting sekali untuk mengurangi derau yang diakibatkan oleh proses transmisi atau akuisisi data dari sebuah citra digital.

Derau pada citra kompleks akan memberikan efek pada distribusi statistik nilai piksel citra tesebut, sehingga derau tersebut harus dieliminasi agar tidak menimbulkan salah interpretasi oleh seorang ahli dari citra tersebut.

Teknik pengolahan citra digital secara konvensional hanya dapat diterapkan pada derau tertentu saja dari citra yang terdegradasi. Filter linier seperti *lowpass* filter, *highpass* filter dan non linier filter seperti median filter merupakan contoh dari filter yang digunakan untuk mengelimansi derau pada citra. Akan tetapi teknik tersebut masih belum mampu untuk mengeliminasi derau yang sifatnya acak. Untuk itu perlu dikembangkan sebuah algoritma yang efisien, handal dan dapat diaplikasikan pada bidang pengolahan citra yang lebih luas. Proses rekonstruksi data fasa dari bentuk tutupannya disebut *Phase Unwrapping* (PU). Fasa absolut tidak dapat diekstraksi secara langsung dari data fasa terlipat. Diperlukan prosedur untuk mencari nilai *phase cycle* yang sesuai dan ditambahkan pada tiap pengukuran fasa untuk memperoleh nilai yang tepat [1].

Pada umumnya semua algoritma PU yang ada menghubungkan nilai fasa dengan melakukan diferensiasi bidang fasa tutupan, mengintegrasikannya secara bertahap, kemudian menambahkan dengan *integral cycle* yang hilang untuk memperoleh solusi yang lebih kontinyu [2]. Algoritma PU yang berkembang saat ini dapat dibagi dalam dua kategori besar, yaitu metode Lokal dan Global [1]. Metode Lokal melakukan *unwrapping* sebuah *pixel* berdasarkan *pixel-pixel* ketetanggaannya, sedangkan metode Global memandang keseluruhan *pixel* yang akan di-*unwrap*.

Beberapa algoritma PU Lokal yang telah dikembangkan antara lain *Goldstein's Branch-Cut*, *Quality-Guided Path Following*, *Mask-Cut*, dan *Flynn's Minimum Discontinuity* [1]. Pendekatan metode PU Global memodelkan solusi dengan menerapkan formalisme matematis. Dalam hal ini, masalah PU diformulasikan dalam bentuk *Minimum L^p-Norm*. Biasanya, algoritma ini menggunakan p = 2, menghasilkan bentuk *Least-Squares*. Pendekatan ini meminimalisasi jumlah (integral) selisih kuadrat antara gradien solusi dan yang terukur yang kemudian menghasilkan solusi yang *smooth*. Metode *Least-Squares* diekspresikan dalam bentuk *unweighted* dan *weighted* [1,2]. Umumnya, konsep *unweighted Least-Squares* PU lebih menekankan proses *unwrapping* pada bagian inkonsistensi fasa daripada mengelilingi bagian tersebut, sehingga menyebabkan kesalahan. Keterbatasan ini diatasi dengan menggunakan faktor pembobotan [1,3]. Metode lain yang banyak dikembangkan adalah metode *Multigrid* klasik akan diperkenalkan dalam perspektif numerik. Diikuti dengan deskripsi aplikasi metode ini dalam menyelesaikan masalah PU. Kemudian, metode *Progressive Multigrid* PU ditujukan untuk meningkatkan performansi metode *Multigrid* klasik [4-6]. Kemudian beberapa tahun terakhir ini telah dikembangkan metode PU dengan pendekatan *Graph Cut*, metode ini mengembangkan PU dengan menghitung energi *source* dan *shink* pada piksel-piksel bertetanggaan [7]. Secara ideal, tanpa adanya derau fasa, singularitas, dan masalah *aliasing*, informasi fasa dapat di-*unwrap* secara mudah [1]. Namun kenyataannya, data fasa sebenarnya selalu mengalami gangguan derau dan diskontinyuitas. Selain itu, gangguan tersebut dapat mempengaruhi daerah yang tidak berderau dan menyebabkan kesalahan pada proses PU. Proses PU menjadi lebih rumit dan membutuhkan algoritma PU yang sesuai untuk mengatasi masalah yang muncul. Untuk itu pada penelitian ini dikembangkan algoritma PU lokal dengan menggunakan pendekatan minimisasi energi piksel-piksel yang bertetanggaan pada orde 1. Pada metode ini dihitung selisih energi dari empat piksel yang bertetanggaan, kemudian dihitung nilai probabilitas untuk mendapatkan jumlah lipatannya.

2. Metode Penelitian

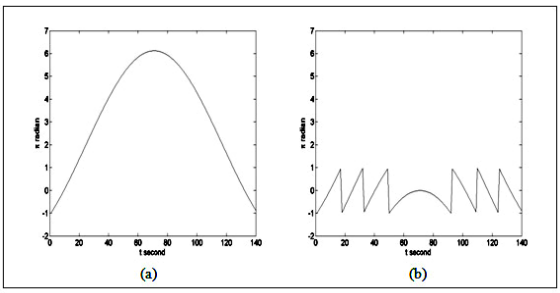
Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah simulasi dan pemodelan. Data simulasi yang digunakan adalah data sintesis yaitu citra ring dan data sesungguhnya yaitu citra InSAR. Adapun tahapan penelitian ini meliputi studi literatur, perancangan sistem, dan analisis hasil. Beberapa teori yang mendasari penelitian ini adalah sebagai berikut:

Phase Unwrapping. *Phase Unwrapping* (PU) merupakan masalah fundamental pada pengolahan citra koheren. Tujuan utama PU adalah mengekstraksi *phase map* untuk menghasilkan suatu informasi yang berguna untuk pemrosesan lebih lanjut. Secara singkat, teknik ini dapat didefinisikan sebagai suatu metode komputasi dimana data fasa absolut yang terestimasi direkonstruksi dari bentuk tutupannya pada *principal value* dengan interval $(-\pi,\pi]$ [4]. Teknik ini berguna untuk meningkatkan akurasi pada aplikasi pengolahan sinyal dan citra koheren. Keterbatasan panjang gelombang secara temporal dan/atau spasial mempengaruhi sinyal, sehingga hanya terletak pada *principal value* dalam modulo 2π. Hal ini berarti fasa terukur tidak berisi informasi fasa absolut dari tiap *pixel*, melainkan *principal value*-nya [1].

Hal ini menunjukkan bahwa *principal value* pada fasa absolut terlipat pada interval $(-\pi,\pi]$ radian yang menghasilkan fasa lipatan. Selain itu, informasi tentang nilai *phase cycle* 2π pada fasa absolut menjadi hilang. Dalam hal ini proses lipatan fasa menyebabkan lompatan fasa secara tiba-tiba pada sekitar tepian. Gambar 1(b) menjelaskan tentang lompatan fasa buatan pada sinyal fasa absolut Gambar 1(a).

Masalah yang muncul pada PU dua-dimensi dipandang lebih sulit daripada PU satu dimensi. Secara matematis, konsep estimasi citra fasa absolut dari bentuk tutupannya dapat diekspresikan sebagai berikut:

$$\phi^u(i,j) = \phi^w(i,j) + k(i,j).2\pi \qquad (1)$$



Gambar 1. Fasa absolut masukan (a), dan bentuk lipatannya (b), pada sinyal fasa satu dimensi [1]

dimana ϕ^u merupakan fasa absolut yang diestimasi, ϕ^w adalah *principal value* dari bentuk tutupannya, dan *k(i,j)* adalah fungsi bentuk *integer* yang merupakan jumlah lipatan dari fase tersebut.

Metode mekanika statistik memungkinkan untuk memproses informasi probabilistik dengan menghitung perubahan energi pada empat piksel yang bertetanggaan. Berbasis pada formulasi Bayesian, maka proses PU yang terdegradasi oleh derau acak dapat dilakukan [4,7,8]. Kemudian dengan menghitung selisih energi dari empat piksel yang bertetanggaan (orde 1) dengan persamaan:

$$\Delta E = (d\phi_{ij}^{w}) + (dk_{ij}) \quad (2)$$

$$(d\phi_{ij}^{w}) = (\phi_{1+i,j}^{w} - \phi_{ij}^{w}) + (\phi_{i,1+j}^{w} - \phi_{ij}^{w}) \quad (3)$$

$$(dk_{ij}) = \{(k_{1+i,j} - k_{ij}) + (k_{i,1+j} - k_{ij})\}.2\pi \quad (4)$$

Dengan mengatur inisialisasi nilai k awal dengan k_0, maka akan didapatkan citra dengan distribusi posterior. Pada $k_0 \rightarrow k_1 \rightarrow \cdots \rightarrow k_n$, nilai k_{k+1} tergantung hanya pada k_k dan tidak tergatung pada keadaan sebelumnya. Kemudian dipilih piksel secara acak dari citra tersebut. Langkah kedua adalah menghitung distribusi *posterior* pada piksel citra sampel dan ditandai dengan $p_{\phi^w k}(k, \phi^w)$. Langkah selanjutnya adalah proses penerimaan dan penolakan, piksel dari citra sampel akan diterima dengan probabilitas p yang diberikan oleh persamaan:

$$p = \min\left(1, p_{\phi^w k}(k, \phi^w)\right) \quad (5)$$

Sedangkan distribusi sebuah citra ϕ seperti pada persamaan di bawah ini:

$$p_{\phi^w k}(k, \phi^w) = \exp(-f_{\phi^w, k}(k, \phi^w)) \quad (6)$$

dengan mensubstitusikan persamaan (1) kedalam persamaan (6), maka:

$$f_{\phi^w, k}(k, \phi^w) = \Delta E / kT$$

sehingga persamaan (6) menjadi:

$$p_{\phi^w k}(k, \phi^w) = \exp(-\Delta E / k_B T) \quad (7)$$

dengan: ΔE = perubahan energi dari piksel-piksel bertetanggaan
k_B = Konstanta Bolztmann
T = Temperatur

Jika diasumsikan bahwa estimasi dari ϕ^u dapat dituliskan dengan persamaan berikut ini:

$$\phi^u = \phi^w + 2\pi(k) \quad (8)$$

Maka nilai k akan diestimasikan dengan nilai (0,1), sehingga estimasi dari ϕ^u dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (8) sesuai dengan perubahan energi dari piksel-piksel yang bertetanggaan. Pada algoritma ini, ketika dibandingkan bagian yang diplih k_{ij} dengan kandidat k_t dengan menghitung perubahan energi dari piksel-piksel yang bertetanggaan. Nilai dari ΔE adalah perubahan energi untuk piksel yang berhubungan dengan piksel bertetangga [9,10].

***Simulated Annealing* (SA).** *Simulated annealing* (SA) adalah salah satu algoritma untuk optimisasi yang bersifat generik. Berbasiskan probabilitas dan mekanika statistik, algoritma ini dapat digunakan untuk mencari pendekatan terhadap solusi optimum global dari suatu permasalahan. Masalah yang membutuhkan pendekatan SA adalah masalah-masalah optimisasi kombinatorial, di mana ruang pencarian solusi yang ada terlalu besar, sehingga hampir tidak mungkin ditemukan solusi eksak terhadap permasalahan itu. Publikasi tentang pendekatan ini pertama kali dilakukan oleh S. Kirkpatrick, dkk. [11] diaplikasikan pada desain optimal *hardware* komputer.

Annealing adalah satu teknik yang dikenal dalam bidang metalurgi, digunakan dalam mempelajari proses pembentukan kristal dalam suatu materi. Agar dapat terbentuk susunan kristal yang sempurna, diperlukan pemanasan sampai suatu tingkat tertentu, kemudian dilanjutkan dengan pendinginan yang perlahan-lahan dan terkendali dari materi tersebut. Pemanasan materi di awal proses *annealing*, memberikan kesempatan pada atom-atom dalam materi itu untuk bergerak secara bebas, mengingat tingkat energi dalam kondisi panas ini cukup tinggi. Proses pendinginan yang perlahan-lahan memungkinkan atom-atom yang tadinya bergerak bebas pada akhirnya menemukan tempat yang optimum yang dibutuhkan atom itu untuk mempertahankan posisinya adalah minimum. *Simulated annealing* berjalan berdasarkan analogi dengan proses *annealing* yang telah dijelaskan di atas. Pada awal proses SA, dipilih suatu solusi awal, yang merepresentasikan kondisi materi sebelum proses dimulai. Pada penelitian pengaturan temperatur diberikan oleh persamaan [11]:

$$T = \frac{C}{\log(s+1)} \quad (9)$$

dengan : T = Temperatur
C = konstanta temperatur awal
s = iterasi

Dari citra yang terdegradasi ϕ dan citra yang telah direstorasi $\hat{\phi}$, maka dapat dihitung *peak signal to noise ratio* (PSNR) dengan persamaan [4]:

$$MSE = \left\langle \left(\phi_{REF} - \hat{\phi}^{u} \right) \right\rangle \quad (10)$$

$$PSNR = \log_{10} \frac{\left(MAX\{\phi_{REF}\}\right)^2}{MSE} (dB) \quad (11)$$

Nilai *peak signal to noise ratio* (PSNR) kecil ketika derau yang ada pada citra terdegradasi besar.

Algoritma *Phase Unwrapping Local Energy* (PULE). Algoritma PULE akan digunakan untuk mensimulasikan restorasi citra dengan distribusi posterior dengan urutan sebagai berikut:

(a) Inisialisasi temperatur awal T dan inisialisasi citra dengan $k_0 = \phi^w$, $k_k = k_0$
(b) Estimasikan nilai k dan tandai dengan k_t.
(c) Hitung perubahan energi ΔE
(d) Hitung probabilitas untuk penolakan dan penerimaan dengan persamaan:

$$p_{\phi^w k}(k, \phi^w) = \exp(-\Delta E / kT)$$

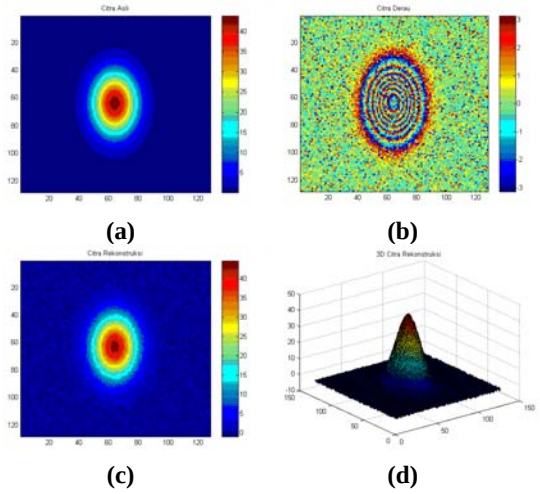
(e) Jika probabilitas < 1, maka piksel citra sampel diterima dengan $k_1 = k_t$; jika tidak $k_1 = k_0$
(f) Ambil k_1 sebagai piksel citra sampel k_k
(g) Turunkan Temperatur T
(h) Kembali ke langkah (2)

3. Hasil dan Pembahasan

Pengujian algoritma PULE dilakukan dengan menggunakan citra sintesis dan citra InSAR seperti pada Gambar 2 dan Gambar 3. Hasil pengujian menggunakan citra sintesis ring dengan koherensi 0,8 seperti pada Gambar 2 didapatkan nilai PSNR 30,5373 dB pada 20 iterasi, sedangkan waktu proses yang dibutuhkan adalah 1,8430 menit. Dari hasil pengujian dengan citra sintesis tampak bahwa proses *unwrap* dari citra fasa telah berjalan dengan baik. Akan tetapi masih belum memberikan hasil yang optimal, hal ini dikarenakan proses penghitungan energi masih belum baik sehingga *update* dari fasa masih belum optimal.

Kinerja algoritma PULE jika dibandingkan dengan algoritma *Phase Unwrapping via Graph Cut* (PUGC), Algoritma *Multigrid Phase Unwrapping* Konvensional (MPUK), dan Algoritma *Multigrid Phase Unwrapping Progresive* (MPUP) [5,8], memberikan nilai PSNR yang lebih baik seperti tercantum pada Tabel 1.

Sedangkan pengujian dengan citra InSAR seperti pada Gambar 3 memberikan hasil bahwa lipatan dari fasa setelah di *rewrap* sudah mendekati dengan lipatan fasa



Gambar 2. Hasil *Phase Unwrapping* Citra Sintesis Ring (a) Citra Sintesis Asli (b) Citra Sintesis dengan Koherensi 0,8 (c) Hasil *Rewrap* Citra Sintesis (d) Grafik 3D *Unwrapping*

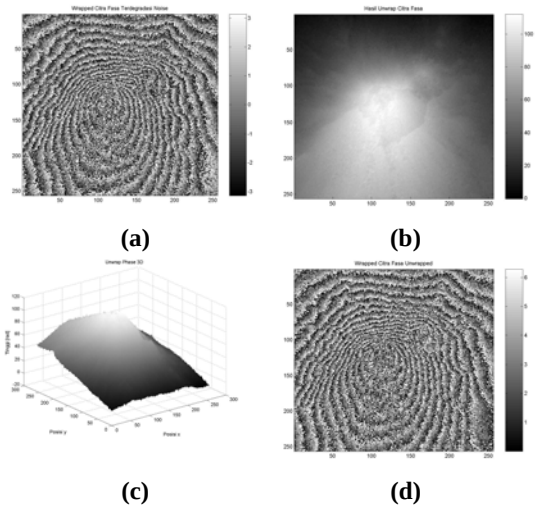
Tabel 1. Perbandingan beberapa Algoritma

Algoritma	PSNR	RMSE
PULE	30,5373	1,0385
PUGC	16,9124	6,2757
MPUK	28,4558	0,7575
MPUP	21,4586	1,6953

sebelum di *unwrap*. Hal ini menunjukkan bahwa proses *unwrapping* sudah berjalan dengan baik seperti terlihat pada Gambar 3(c) plot grafik 3D *Unwrapping* citra InSAR, tampak pada plot grafik tersebut, menggambarkan ketinggian kontur pada citra InSAR. Akan tetapi masih terjadi kekurangan pada proses *unwrap* citra InSAR, di mana citra hasil *rewrap* masih terjadi inkonsistensi pada lipatan-lipatan fasa yang sudah di *rewrap*, hal ini disebabkan oleh proses minimisasi energi lokal belum optimal.

Jika diamati dari grafik perubahan energi vs iterasi seperti pada Gambar 4(a), tampak bahwa perubahan energi menurun drastis sampai pada iterasi kedua, selanjutnya pada iterasi ketiga sampai iterasi 20 perubahan energi turun sedikit demi sedikit hingga mencapai 0 pada iterasi ke 20. Berdasarkan hal tersebut proses minimisasi energi sudah berjalan dengan baik.

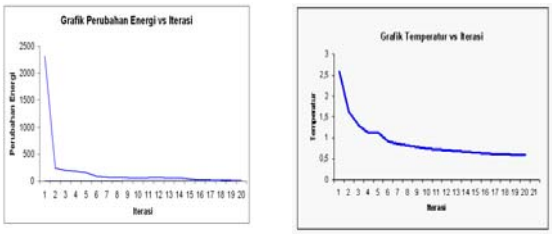
Demikian pula untuk proses penurunan temperatur, berdasarkan pada Gambar 4(b) temperatur turun secara signifikan sampai pada iterasi ke 4, bahkan pada iterasi ke 5 terjadi kenaikan sedikit dan iterasi ke 6 sampai ke 20 temperatur cenderung turun sampai temperatur tersebut konstan. Hal ini menunjukkan bahwa proses



(a) (b)

(c) (d)

Gambar 3. Hasil *Phase Unwrapping* Citra InSAR (a) Citra InSAR Dengan Koherensi 0,8 (b) Hasil *Unwrapping* Citra InSAR (c) Grafik 3D *Unwrapping* Citra InSAR (d) Hasil Re-Wrapp Citra InSAR



a b

Gambar 4. Grafik Energi dan Temperatur (a) Grafik Energi vs Iterasi, (b) Grafik Temperatur vs Iterasi

minimisasi energi telah mencapai titik yang konvergen, sehingga proses *update* dari setiap piksel yang bertetanggaan sudah mencapai titik jenuh.

4. Kesimpulan

Telah dilakukan pengembangan algoritma phase *unwrapping* dengan menggunakan pendekatan minimisasi energi lokal dan memberikan peningkatan nilai PSNR dibandingkan dengan beberapa algoritma, diantaranya: algoritma *Phase Unwrapping via Graph Cut* (PUGC), algoritma *Multigrid Phase Unwrapping* Konvensional (MPUK), dan algoritma *Multigrid Phase Unwrapping Progresive* (MPUP). Pada penelitian ini didapatkan hasil nilai PSNR 30,5373 dB pada 20 iterasi, sedangkan waktu proses yang dibutuhkan adalah 1,8430 menit dengan koherensi 0,8. Beberapa faktor yang mempengaruhi adalah: tingkat koherensi, proses minimisasi energi, temperatur dan iterasi.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih kepada DIKTI yang telah memberikan bantuan berupa beasiswa ataupun penelitian yang dibiayai oleh DIKTI.

Daftar Acuan

[1]. D.C. Ghiglia, M.D. Pritt, Two Dimensional Phase Unwrapping: Theory, Algorithms, and Software, John Wiley & Sons, Inc. ISBN 0-417-24935-1, 1998.

[2]. H.A. Zebker, Y. Lu, Journal of Optical Society of America, 15/3 (1998).

[3]. M.D. Pritt, Phase Unwrapping by Means of Multigrid Techniques for Interferometric SAR, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 34/3) (1996) 728-738.

[4]. A.B. Suksmono and A. Hirose, Progresive Trasnform-Based Phase Unwrapping Utilizing a Recursive Structure, IEICE Trans. Communication, E89-B/3 (2006) 929-936.

[5]. D.E.O. Dewi, A.B. Suksmono, T.L.R. Mengko, The 7 International Workshop on Enterprise Networking and computing in Healthcare Industry, Busan, Korea, 2005.

[6]. A. B. Suksmono and A. Hirose, IECI Chapter Japan Series, 3/1, ISSN 1344-749 (2001) pp. 70-77.s

[7]. Jos M. Bioucas-Dias Gonalo Valadao, IEEE Transactions on Image Procesiing, 16/3, ISSN: 1057-7149 (2007) 698-709.

[8]. H. Nishimori, Statistical physics of spin glasses and information processing: an introduction, Oxford university Press, Oxford, 2001.

[9]. J. M. Pryce, A. D. Bruce, J. Phys. A: Math. Gen. A 28 (1995) 511

[10]. G.K. Nicholls, S.M. Tan, Inverse Problems, PHYSICS 707, The University of Auckland, *http://www.math.auckland.ac.nz*, 2006.

[11]. S. Kirkpatrick, C.D. Gelatt, M.P. Vecchi, Science, 220/4598 (1983) 671-680.