

SEBUAH TELAHAH: METODE ALOKASI DAN KONTROL DAYA SINYAL TRANSMISI PADA SISTEM KOMUNIKASI SELULER

Diky Siswanto¹⁾, Fachrudin²⁾, Mohamad Mukhsim³⁾

^{1,2,3}Jurusan Teknik Elektro, Universitas Widyagama Malang, Malang
Email: 1dsiswanto@widyagama.ac.id

Abstrak

Pada sistem komunikasi seluler, selain dipengaruhi kondisi kanal propagasi, kualitas sinyal yang diterima dipengaruhi oleh besar interferensi yang diterima. Untuk memaksimalkan performa sistem, alokasi sumber daya radio tidak bisa diterapkan hanya dengan memperbesar daya sinyal transmisi, yang mana hal ini akan menjadi sumber interferensi bagi sel-sel tetangga. Sejumlah metode alokasi daya untuk sistem seluler telah ditawarkan. Sementara itu, sistem komunikasi seluler telah mengalami evolusi mengikuti kebutuhan lebar pita frekuensi dari penggunaannya. Perbedaan teknik pengolahan sinyal pada tiap sistem seluler berdampak pada beda performa serta karakteristik sistem. Pemilihan strategi kontrol daya untuk sistem komunikasi seluler perlu mengetahui karakteristik sistem agar bisa tercapai hasil optimal.

Kata kunci: alokasi sumber daya radio, alokasi daya, kontrol daya sinyal transmisi, sistem komunikasi seluler

Abstract

In cellular communication systems, in addition to being influenced by the propagation channel conditions, the received signal quality is influenced by the received interference. In order to maximize system performance, the radio resource allocation cannot be applied merely by increasing the transmission signal power, in which it will be the interference source for neighboring cells. Some power allocation methods for cellular systems have been offered. Meanwhile, the cellular communication system has undergone evolution following the needs of the frequency bandwidth of their users. The difference in signal processing techniques of each cellular system has an impact on the performance and characteristics of the system. Selection of power control strategies for cellular communication systems needs to understand the system characteristics so that optimal results can be achieved.

Keywords: radio resource allocation, power allocation, transmission signal power control, cellular communication system

PENDAHULUAN

Telefon seluler telah menjadi prasarana penting dalam lebih dari 2 dekade belakangan. Bagi penyedia layanan, jaringan seluler bisa menghemat waktu dan biaya instalasi maupun perawatan. Bagi para pelanggan, telefon seluler memudahkan mereka berkomunikasi di mana pun, kapan pun dan bagaimana pun.

Dalam laporannya (Qureshi, 2014) disampaikan bahwa jumlah langganan telepon seluler tumbuh mendekati 7% per tahun dalam kuartal I 2014. Bahkan, jumlah langganan telepon seluler pita lebar tumbuh lebih cepat, dengan laju 35% per tahun dalam periode yang sama. Peningkatan jumlah trafik dan kebutuhan aplikasi mendorong evolusi jaringan heterogen (*heterogeneous network*), yaitu sebuah jaringan yang terdiri dari berbagai teknologi akses radio, arsitektur, solusi transmisi, dan *base station* dengan daya sinyal transmisi bervariasi.

Sementara itu, keterbatasan spektrum radio menuntut operator jaringan seluler bisa memanfaatkan sumber daya radio secara efisien dan efektif. Berbagai strategi diterapkan untuk hal ini. Strategi alokasi sumber daya radio yang mempertimbangkan posisi geografis antara lain *clustering*, sektorisasi, serta *beamforming* (Goldsmith, 2005). Sedangkan strategi yang mempertimbangkan spektrum dan daya sinyal transmisi antara lain pemecahan spektrum (*spectrum splitting*) (Siswanto, Zhang and Navaie, 2014), alokasi-ulang frekuensi (*frequency reuse*) (Rappaport, 2002) serta kontrol daya sinyal transmisi (Qian and Gajic, 2003). Untuk diferensiasi kanal akses bagi masing-masing pengguna antara lain terdapat metode diferensiasi frekuensi akses (FDMA), waktu akses (TDMA), kode akses (CDMA) serta frekuensi *orthogonal* (OFDMA).

Sebagai bagian dari strategi alokasi sumber daya radio, alokasi dan kontrol daya sinyal transmisi punya peran dalam menunjang performa dan kapasitas sistem seluler. Pada artikel ini akan didiskusikan sejumlah algoritma terkait alokasi dan kontrol daya sinyal transmisi pada sistem radio seluler. Tujuan dari artikel ini adalah mengkaji berbagai algoritma alokasi dan kontrol daya transmisi pada sistem komunikasi seluler serta menganalisa performa dan kemungkinan penerapannya pada teknologi seluler yang ada. Pada Sesi 2 akan dibahas manajemen sumber daya radio. Sedangkan pada Sesi 3 akan didiskusikan sejumlah strategi alokasi dan kontrol daya sinyal transmisi. Dan terakhir, kesimpulan dipaparkan pada Sesi 4.

MANAJEMEN SUMBER DAYA RADIO pada SISTEM KOMUNIKASI SELULER

Alokasi dan kontrol daya sinyal transmisi pada sistem seluler adalah sebagian strategi untuk mengalokasikan-ulang frekuensi yang sama pada dua atau lebih lokasi geografis berbeda yang terpisah jarak tertentu. Dalam kondisi ekstrim, kontrol daya yang tepat memungkinkan sel-sel yang bersebelahan mengalokasikan spektrum frekuensi yang sama, sebagaimana pada sistem seluler *code division multiple access* (CDMA). Dengan alokasi kode akses berbeda pada tiap

pengguna, sistem CDMA bisa menerapkan alokasi-ulang frekuensi berdampingan langsung antara sel-sel dengan spektrum yang sama (*frequency reuse-1*). Dengan konsep yang sama, kontrol daya optimal dimungkinkan penerapannya pada sejumlah sel secara berdampingan pada sistem seluler secara umum serta diharapkan menghasilkan kapasitas optimal (Rofii, Toscani and Siswanto, 2016).

Pada sistem radio seluler, performa sistem ditentukan oleh rasio daya sinyal terhadap daya interferensi yang diterima (*signal-to-interference-ratio: SIR*). Hal ini disebabkan sistem radio seluler perlu mengalokasikan-ulang frekuensi akibat keterbatasan sumber daya radio. Meski secara umum interferensi perlu dihindari pada sebuah sistem komunikasi, adanya interferensi masih dibolehkan selama capaian SIR melebihi level ambang yang ditetapkan. Sehingga, alokasi daya sinyal transmisi yang terkendali optimal pada tiap sel berpeluang mengurangi interferensi antar kanal-bersama, yang mana penurunan interferensi berpotensi meningkatkan kapasitas sistem seluler meskipun daya sinyal transmisi dialokasikan dengan besaran sama.

ALOKASI dan KONTROL DAYA SINYAL TRANSMISI pada SISTEM SELULER

Pada sistem Gaussian, derau (*noise*) bisa diatasi dengan meningkatkan rasio sinyal terhadap noise (*signal-to-noise ratio: SNR*). Berbeda dengan sistem Gaussian, keterbatasan sumber daya radio menuntut sistem seluler mengalokasikan-ulang frekuensi yang menyebabkan munculnya interferensi antar kanal yang sama. Interferensi jenis ini tidak bisa dilemahkan dampaknya dengan sekedar meningkatkan daya sinyal transmisi dari sebuah pemancar. Peningkatan daya sinyal transmisi akan meningkatkan interferensi pada sel-sel tetangga dengan kanal sama.

Sistem komunikasi seluler memerlukan sebuah cara sederhana dalam mengendalikan daya sinyal berkaitan dengan pengguna yang tersebar acak serta alokasi-ulang frekuensi (*frequency reuse*) pada sel yang lain, sebagaimana terdapat pada sistem GSM dan CDMA. Alokasi-ulang frekuensi bisa dimaksimalkan dengan cara mengalokasikan-ulang frekuensi dengan daya sinyal transmisi terbatas. Sistem terdistribusi menjadi opsi penting mengingat sistem terpusat memiliki banyak keterbatasan, seperti butuh prasarana tambahan, keterlambatan proses, dan kelemahan jaringan.

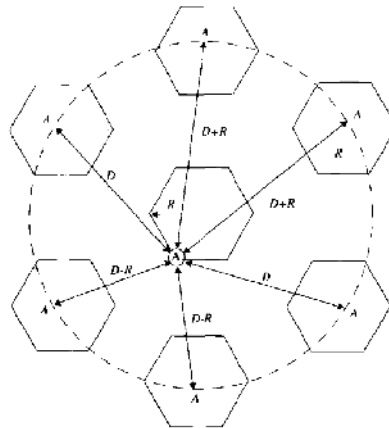
Sel-sel tersebut diistilahkan dengan sel-sel kanal bersama (*co-channel cells*). Sedangkan interferensi antar sel tersebut diistilahkan dengan interferensi

kanal-bersama (*co-channel interference*).Pengurangan interferensi kanal-bersama bisa dilakukan melalui pemisahan jarak fisik minimal antar sel kanal-bersama untuk memberikan isolasi cukup akibat rugi-rugi propagasi. Ketika daya sinyal transmisi dari tiap *base station* dan eksponen rugi lintasan bernilai sama pada daerah layanan, nilai SIR untuk sebuah perangkat bergerak adalah (Rappaport, 2002):

$$\frac{S}{I} = \frac{R^{-n}}{\sum_{i=1}^{i_0} (D_i)^{-n}} \quad (1)$$

dengan i_0 = jumlah sel penginterferensi kanal-bersama. R = radius sel. D = jarak antar pusat sel kanal-bersama. n = eksponen rugi lintasan.

Teknik alokasi sumber daya radio seperti diatas bisa diterapkan pada sistem seluler secara terpusat tanpa fitur kontrol daya dinamis. Meski demikian, kondisi kanal radio yang dinamis akan berdampak pada fluktuasi kualitas SIR. Selain itu, distribusi dinamis dan acak dari pengguna memerlukan jaringan seluler memiliki kemampuan kontrol daya sinyal transmisi dinamis dan adaptive terhadap posisi pengguna. Gambar 1 mengilustrasikan lapis pertama sel kanal bersama dan dampak interferensinya.



Gambar 1. Ilustrasi lapis pertama sel-sel kanal-bersama (Rappaport, 2002)

Pada paper ini (Foschini and Miljanic, 1993) ditawarkan algoritma kontrol daya sederhana, terdistribusi, dan otomatis. Algoritma tersebut memanfaatkan pengukuran lokal terhadap daya dan interferensi, yang selanjutnya digunakan untuk mengatur kontrol dinamis. Pada algoritma yang ditawarkan, daya sinyal transmisi pada waktu sesaat berikutnya $P_i(k+1)$ adalah:

$$P_i(k+1) = (1 - \beta)P_i(k) \left(1 + \frac{\beta \cdot p}{1 - \beta P_i} \right) \quad (2)$$

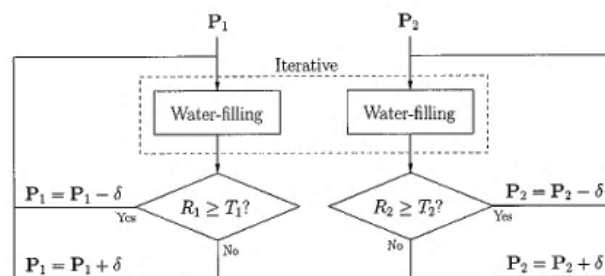
Dengan k = indikator waktu sesaat. i = indeks pengguna. β = faktor proporsionalitas. p = SIR target. Hasil simulasi menunjukkan bahwa algoritma yang

diusulkan mencapai konvergensi cepat secara iterativ eksponensial. Selain itu, algoritma ini bisa dikonfigurasi untuk mempercepat konvergensi, yang mana jumlah iterasi turun dengan naiknya ukuran langkah (*step size*).

Meski demikian, titik-titik optimal global tidak begitu saja mudah dicapai pada metode diatas, sebagaimana umumnya terjadi pada pendekatan iterativ. Hal ini disebabkan oleh sulitnya penentuan *step size* yang bisa berhenti tepat pada titik optimal global. Selain itu, penentuan SIR target yang optimal pada jaringan seluler tidak mudah dilakukan, yang juga menambah sulitnya mencapai titik optimal global.

Untuk mengoptimalkan laju data pada sejumlah sistem saluran pelanggan digital (*digital subscriber line: DSL*), sebuah metoda kontrol daya terdistribusi berbasis sebuah teknik *iterative water-filling (IWF)* ditawarkan (Yu, Ginis and Cioffi, 2002).

Pada *paper* tersebut (Yu, Ginis and Cioffi, 2002), kanal interferensi dimodelkan sebagai sebuah *non-cooperative game*. Metode tersebut bisa diterapkan secara distributif tanpa kontrol terpusat. Teknik ini menghasilkan alokasi daya optimal kompetitif yang memberi kesempatan menegosiasi utilisasi terbaik dari frekuensi dan daya antara dua sisi sistem. Dengan memperhitungkan daya interferensi pada proses alokasi daya tiap kanal, IWF dimungkinkan penerapannya pada sistem komunikasi seluler yang berkarakteristik mengalokasikan-ulang frekuensi dan mengatur daya sinyal transmisi optimal. Dengan karakteristik *non-cooperative game*, algoritma IWF akan menghasilkan tiap pemancar melakukan iterasi bergantian untuk mengalokasikan daya optimal berdasarkan informasi kondisi kanal terbaru. Saat proses iterasi akan terjadi jeda waktu antara estimasi kanal, perhitungan daya berdasarkan hasil estimasi kanal, serta alokasi daya sinyal transmisi. Sehingga, ketika kondisi kanal cepat berubah, akan terjadi ketidak-sesuaian antara hasil estimasi kanal dengan besarnya alokasi daya. Gambar 2 menyajikan ilustrasi algoritma kontrol daya IWF tersebut diatas.



Gambar 2. Ilustrasi sistem kontrol daya *iterative water-filling* (Yu, Ginis and Cioffi, 2002)

Pada artikel berikut (Siswanto *et al.*, 2016) ditawarkan algoritma alokasi dan kontrol daya *sub-Optimal Spectrum and Power Allocation* (sOSPA) untuk meminimalkan interferensi antar sel dan mengoptimalkan *sum-rate* pada model jaringan selular heterogen berbasis multi-kanal (OFDMA). Metode yang diusulkan berbasis algoritma *local search* dan *penalty function*. Untuk mendekati sebuah hasil optimal global, pada metode tersebut ditetapkan prosedur keluar dari iterasi saat mencapai titik kritis berbasis kondisi fungsi batasan (*constraint*). Hasil simulasi menunjukkan bahwa metode yang diusulkan, dengan SIR ambang 4 dB, bisa mendekati kondisi optimum dengan performa terbaik dibandingkan metode konvensional lain, termasuk teknik IWF.

```

0: Initialization:
    $P_{tot}^M, P_{tot}^F, P_n^M, P_n^F, d_{MF0}, N_k^M, N_k^F, channel\_type;$ 
1:  $(d_M, d_F, d_{MF}, d_{FM}) \leftarrow$  load distance_vector;
2:  $(G^M, G^F, G^{MF}, G^{FM}) \leftarrow$  generate channel_gain;
3:  $\max_k (G_k^{Mn}, G_k^{Fn}, G_k^{MFn}, G_k^{FMn}), \forall n \in N, \forall k \in K$ 
    $\leftarrow$  find the best gain of each subchannel;
4:  $f(P_k^{M,n}, P_k^{F,n}) \leftarrow$  set the objective function (2);
5:  $\nabla f \leftarrow$  set the gradient function;
6:  $\mathcal{C} \leftarrow$  set constraint functions and matrix (9 - 11);
7: while NOT stopping condition do
8:    $\mathbf{A} \leftarrow$  set the step size matrix (8);
9:   Calculate the penalty function:  $\delta, \Omega$  and  $\mathcal{V}(\mathbf{X})$ 
      (12 - 14)
10:  Update  $\mathbf{X}^{i+1}$ ; (15)
11:  Evaluate variable bounds,
      e.g.  $P \geq 0, \sum P_n \leq P_{tot}$ ;
12:   $count(N_k^M, N_k^F)$ ;
13:   $set(P_{tot}^{M,n}, P_{tot}^{F,n})$ 
14:  Evaluate stopping conditions (16 - 18)
15: end while
    
```

Gambar 3. Algoritma *sub-Optimal Spectrum and Power Allocation* (Siswanto *et al.*, 2016)

(Qian and Gajic, 2003) menawarkan sebuah skema kontrol daya optimal (KDO) yang cepat berbasis SIR loop-tertutup untuk sistem CDMA. Dengan bedakode akses, sejumlah pengguna yang posisinya berdekatan bisa mengakses jaringan CDMA menggunakan frekuensi dan waktu yang sama. Sehingga memungkinkan alokasi-ulang spectrum pada sejumlah sel yang bersebelahan (*frequency reuse-1*).

Inti dari KDO adalah bahwa evolusi daya secara langsung dikendalikan oleh selisih nilai antara SIR yang sebenarnya dan SIR target. Besarnya perubahan daya proporsional dengan selisih nilai SIR, dan nilai optimal dipilih untuk mencapai selisih nilai SIR minimum pada waktu sesaat berikutnya. Dengan asumsi estimasi dan prediksi sempurna terhadap kualitas kanal, selisih nilai SIR menjadi nol dalam

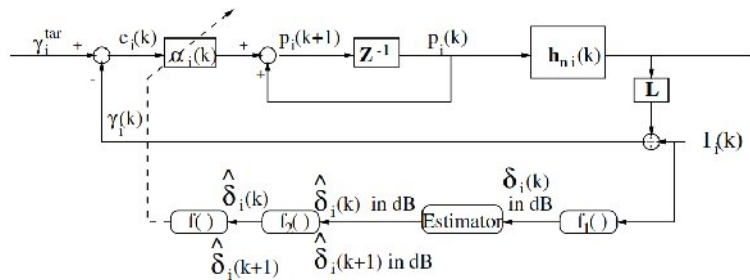
satu langkah. Dalam situasi praktis, ketika estimator membutuhkan beberapa langkah untuk membuat perkiraan dan prediksi akurat, kesalahan SIR menjadi nol dalam waktu kurang dari sepuluh langkah. Pada KDO, metode yang diusulkan adalah pengontrol berbasis estimator (Qian and Gajic, 2003). Sejumlah fungsi yang terlibat:

$$f_1(x) = 10 \log_{10} x; \tag{3}$$

$$f_2(x) = 10^{-x}/10; \tag{4}$$

$$f(x_1, x_2) = \begin{cases} \frac{1}{x_2} \left(1 - \frac{\gamma^{tar}}{e(k)}\right) + \frac{1}{x_2} \frac{\gamma^{tar}}{e(k)}, & \text{jika } e(k) \neq 0; \\ 0, & \text{selainnya.} \end{cases} \tag{5}$$

dengan x_1, x_2 = sejumlah variable input. γ^{tar} = SIR target. $e(k) = \gamma^{tar} - \gamma(k)$, selisih antara SIR target dengan SIR saat k . Gambar 4 memberikan ilustrasi sistem kontrol daya optimal terdistribusi tersebut.



Gambar 4. Sistem kontrol daya optimal terdistribusi dengan sebuah estimator (Qian and Gajic, 2003)

Dengan mempertimbangkan batasan (*constraint*) optimisasi, prediksi daya sinyal transmisi pada waktu sesaat berikutnya $p_i(k+1)$ adalah (Qian and Gajic, 2003):

$$p_i(k+1) = \begin{cases} p^{min}, & \text{jika } \delta_i(k+1) > \frac{\gamma_i^{tar}}{p^{min}} \\ p^{max}, & \text{jika } \delta_i(k+1) < \frac{\gamma_i^{tar}}{p^{max}} \\ p_i(k) + \alpha_i(k) e_i(k) - \frac{\gamma_i^{tar}}{\delta_i(k+1)}, & \text{selainnya.} \end{cases} \tag{6}$$

Dengan p^{min} dan p^{max} = daya sinyal transmisi minimal dan maksimal. $\delta_i(k+1) = \frac{r_i(k+1)}{I(k+1)}$ = prediksirasio *channel gain* terhadap daya interferensisaat $k+1$. $p_i(k)$ = daya sinyal transmisi saat waktu k . Hasil simulasi menunjukkan bahwa skema kontrol daya optimal tersebut memberikan solusi sangat menjanjikan bagi

kontrol daya terdistribusi dalam sistem CDMA. Pada sistem *orthogonal frequency division multiple access* (OFDMA), alokasi daya tiap sub-kanal diperhitungkan. KDO tidak bisasekedar diterapkan secara paralel pada tiap sub-kanal. Karena seluruh sub-kanal memiliki saling keterkaitan terkait total daya yang dialokasikan tiap node pada jaringan seluler. Sehingga perlu penyesuaian agar bisa diterapkan pada sistem OFDMA.

Tabel 1. Beberapa algoritma alokasi dan kontrol daya pada sistem seluler

Algoritma	Strategi	Karakteristik	Kemungkinan Implementasi
Frequency reuse (Rappaport, 2002)	Penetapan rasio daya sinyal terhadap interferensi (SIR)	Berbasis SIR, sentralistik, statis	Semua teknologi selular
Algoritma Foschini-Miljanic (Foschini and Miljanic, 1993)	Pengukuran daya & interferensi lokal, proses evolusi penetapan daya transmisi terdistribusi dengan perhitungan SIR	Berbasis SIR, <i>iterative, distributive, dinamis</i>	Teknologi selular kanal tunggal (FDMA, TDMA, CDMA)
Iterative water filling (Yu, Ginis and Cioffi, 2002)	Pengukuran interferensi lokal, alokasi daya optimal multi-kanal kompetitif	Berbasis algoritma <i>water filling, iterative, distributive, dinamis</i>	Sistem ADSL, Teknologi selular multi-kanal (OFDMA)
sOSPA (Siswanto <i>et al.</i> , 2016)	Penetapan SIR ambang, Pengukuran <i>channel-gain</i> dan interferensi antar sel, algoritma <i>line search & penalty function</i> utk menemukan global optimal	<i>Iterative, sentralistik, sub-optimal, konvergen cepat, dinamis</i>	Teknologi selular multi-kanal (OFDMA)
Kontrol daya optimal (Qian and Gajic, 2003)	Berbasis SIR, <i>closed-loop power control</i> , perubahan daya dikendalikan oleh selisih SIR aktual dan target	<i>Distributive, global optimal, konvergen cepat, dinamis</i>	Teknologi selular kanal-tunggal (CDMA)

KESIMPULAN

Selain dipengaruhi kondisi kanal propagasi, kualitas sinyal yang diterima pada sistem seluler dipengaruhi oleh besarnya interferensi yang diterima. Untuk memaksimalkan performa sistem, alokasi sinyal transmisi tidak bisadilakukan hanya dengan memperbesar daya sinyal transmisi, yang mana hal ini akan menjadi sumber interferensi bagi sel-sel tetangga. Sejumlah pendekatan alokasi daya sinyal transmisi telah ditawarkan, antara lain alokasi-ulang frekuensi dengan pengaturan jarak antar kanal bersama, juga kontrol daya dengan karakter iteratif, distributif serta dengan menggunakan estimator kanal. Disisi lain, sistem komunikasi selular telah mengalami evolusi mengikuti kebutuhan lebar pita frekuensi dari pengguna.

Setiap standar sistem selular menggunakan teknik pengolahan sinyal berbeda, yang memiliki dampak berbeda pada performa serta karakteristik sistem. Sehingga, untuk mencapai hasil optimal, pemilihan strategi alokasi dan kontrol daya sinyal transmisi perlu mempertimbangkan karakteristik dari sistem yang dimaksud.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada DRPM-KEMENRISTEK-DIKTI yang telah memberikan hibah riset dengan kontrak No. 002/Kontrak/PTS.030.7/PN/III/2018, sehingga artikel ini bisa terselesaikan.

REFERENSI

- Foschini, G. J. and Miljanic, Z. (1993) 'A Simple Distributed Autonomous Power Control Algorithm and its Convergence', *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 42(4), pp. 641–646. doi: 10.1109/25.260747.
- Goldsmith, A. (2005) *Wireless communications*. Cambridge, England: Cambridge University Press.
- Qian, L. and Gajic, Z. (2003) 'Optimal Distributed Power Control in Cellular Wireless Systems', *Dynamics of Continuous Discrete and Impulsive Systems*, 10, pp. 537–559. Available at: <http://monotone.uwaterloo.ca/>.
- Qureshi, R. (2014) *Ericsson Mobility Report: On the Pulse of the Networked Society, White Paper*. Stockholm, Sweden. doi: 10.3103/S0005105510050031.
- Rappaport, T. S. (2002) *Wireless Communications: Principles and Practice*. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall Inc.
- Rofii, F., Toscani, M. D. and Siswanto, D. (2016) 'Optimization of coverage and the number of base transceiver station towers using fuzzy C-Means and genetic algorithm', *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 93(1), pp. 164–173.
- Siswanto, D. *et al.* (2016) 'Weighted Sum Throughput Maximization in Heterogeneous OFDMA Networks', in *IEEE 83rd Vehicular Technology Conference: VTC2016-Spring*. Nanjing, China: IEEE.
- Siswanto, D., Zhang, L. and Navaie, K. (2014) 'Spectrum splitting-based cognitive interference management in two-tier LTE networks', *2014 11th International Symposium on Wireless Communications Systems, ISWCS 2014 - Proceedings*, (July), pp. 613–617. doi: 10.1109/ISWCS.2014.6933427.
- Yu, W., Ginis, G. and Cioffi, J. M. (2002) 'Distributed multiuser power control for digital subscriber lines', *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 20(5), pp. 1105–1115. doi: 10.1109/JSAC.2002.1007390.