

Pengolahan isyarat satu dimensi, seperti isyarat pada ranah waktu, telah berperan penting dalam perkembangan teknologi. Pengolahan isyarat satu dimensi kemudian dikembangkan lebih lanjut sehingga dapat diterapkan pada isyarat multi-dimensi, seperti isyarat gambar, dan isyarat yang didefinisikan pada ranah waktu-spasial. Pada dekade terakhir, konsep pengolahan isyarat dikembangkan lebih lanjut untuk dapat diterapkan pada isyarat yang terdefinisi pada struktur tak sederhana yang dikenal dengan graf. Pengolahan isyarat pada graf (*graph signal processing*, GSP) dapat dipandang sebagai generalisasi pengolahan isyarat ranah waktu mengingat ranah waktu dapat dipandang sebagai graf satu jalur (*path graph*). Dalam pengolahan isyarat satu dimensi, analisis spektrum atau analisis terhadap representasi isyarat di ranah frekuensi memainkan peranan yang penting. Spektrum suatu isyarat dihasilkan dengan mengaplikasikan transformasi Fourier terhadap isyarat satu dimensi. Analisis spektrum memberikan informasi terkait kontribusi tiap-tiap komponen frekuensi dalam suatu isyarat. Analisis serupa bisa dilakukan pada isyarat graf dengan pertama-tama mendefinisikan konsep frekuensi pada graf, komponen isyarat graf frekuensi tinggi, dan komponen isyarat graf frekuensi rendah. Definisi ini memungkinkan diperkenalkannya transformasi Fourier graf (*graph Fourier transform*, GFT).

Dengan diperkenalkannya GFT, dapat diketahui apakah suatu isyarat graf didominasi oleh komponen isyarat yang sangat berfluktuatif (saat dievaluasi pada *node-node* yang bertetangga) atau oleh komponen isyarat yang memiliki fluktuasi yang minimal atau bahkan relatif konstan. Konsep GFT dapat digunakan untuk menganalisis isyarat pada *node-node* di suatu jaringan, seperti jaringan biologis, jaringan transportasi, jaringan sensor, serta jaringan internet dan telekomunikasi. Pada tugas akhir ini, jaringan radio kognitif (*cognitive radio*, (CR)) akan menjadi bahan studi kasus aplikasi GSP. Pada jaringan CR, pengguna sekunder, yang tidak memiliki lisensi terhadap suatu pita frekuensi, diizinkan untuk menggunakan pita frekuensi milik pengguna primer, yang memiliki lisensi atas pita frekuensi tersebut, selama pengguna primer tidak aktif. Untuk mengetahui aktif tidaknya pengguna primer pada suatu pita frekuensi, beberapa pengguna sekunder perlu bekerja sama dalam melakukan penginderaan spektrum (*collaborative spectrum sensing*, (CSS)).

Teori graf dapat digunakan untuk memodelkan beberapa pengguna sekunder yang melakukan CSS sebagai *node-node* pada graf. Dengan pemodelan ini, GSP dapat diterapkan pada CSS untuk mengidentifikasi terjadinya falsifikasi data hasil penginderaan spektrum oleh pengguna sekunder yang bermaksud jahat. Terjadinya falsifikasi data ini kemungkinan akan menimbulkan anomali pada nilai spektral daya yang dilaporkan oleh pengguna-pengguna sekunder. Anomali yang terjadi kemudian dapat diidentifikasi dengan mengaplikasikan GFT pada isyarat graf yang berupa nilai-nilai spektral daya. Proses identifikasi ini dapat dilakukan karena anomali hasil pengukuran spektral daya yang terjadi akan cenderung mengakibatkan tingginya kontribusi komponen isyarat graf frekuensi tinggi pada isyarat graf yang berupa pengukuran nilai spektral daya di atas.

Fokus penelitian ini adalah pada graf berbobot serta pengaruh pemodelan jaringan pengguna-pengguna sekunder yang melakukan CSS sebagai graf berbobot dalam proses identifikasi falsifikasi data pada CSS di jaringan CR. Hasil studi simulasi yang dilakukan mengindikasikan bahwa penggunaan GFT untuk mengidentifikasi terjadinya falsifi-

kasi data hasil penginderaan spektrum memiliki tingkat keberhasilan yang cukup tinggi terutama jika pelaku falsifikasi data adalah pengguna sekunder yang memiliki jumlah tetangga yang relatif banyak.

Kata Kunci : pengolahan isyarat graf, transformasi Fourier graf, graf berbobot, jaringan radio kognitif, penginderaan spektrum kolaboratif

ABSTRACT

The contribution of one-dimensional signal processing (such as time-domain signal processing) theory is extremely significant in the technological advancement. The one dimensional signal processing theory has also been developed, which allows the signal processing theory to be applied on multi-dimensional signals (such as image) as well as signals defined on both time and spatial domains. The last decade has witnessed the generalization of signal processing theory to tackle signals defined on a complex structure labeled as graph. Graph signal processing (GSP) can be perceived as the generalization of time-domain signal processing as the time domain can be considered as a simple path graph.

Spectral analysis, or analysis on signal representation in the frequency domain, plays a vital role in one-dimensional signal processing. The spectrum of a one-dimensional signal is produced by applying Fourier transform on the signal. Spectrum analysis provides information about the contribution of each frequency component on a signal. Similar analysis can be conducted on a graph signal by first defining the concept of graph frequency, high-frequency graph signal, and low-frequency graph signal. This definition allows the introduction of the so-called graph Fourier transform (GFT). By applying GFT on a graph signal, it is possible to identify whether the highest contribution in the graph signal comes from the signal component having a high fluctuation (when it is evaluated over neighboring nodes) or from the one having a minimal fluctuation.

GFT can be exploited to analyze signal defined at nodes in a network, such as biological networks, transportation networks, sensor networks, and internet and telecommunication networks. This manuscript evaluates the application of GSP on a cognitive radio (CR) network. In a CR network, a secondary user (SU) that does not possess license on any frequency band is allowed to borrow a frequency band licensed to a so-called primary user (PU) when the PU is inactive. In order to track PU activities in a frequency band, several SUs need to conduct collaborative spectrum sensing (CSS). Graph theory can be used to model a group of cooperating SUs as nodes in a graph. Based on this model, GSP can be applied on CSS to identify the existence of falsification of the spectrum sensing (SS) results conducted by a malicious SU. This SS data falsification is likely to introduce anomaly on the power spectrum values reported by the SUs. The anomaly can then be identified by applying GFT on a graph signal formed by the power spectrum measured by different SUs. This identification of data falsification is possible since the anomaly is likely to result in a high contribution from the high-frequency graph signal components on the graph signal formed by the measured power spectrum.

The research on this manuscript concentrates on a weighted graph and the impact of modeling a group of SUs conducting CSS as a weighted graph in the identification of SS data falsification in CSS applications. The result of simulation study indicates that the application of GFT to identify the existence of SS data falsification is quite successful especially when the malicious user has a relatively large number of neighbors.

Keywords : graph signal processing, graph Fourier transforms, weighted graph, cognitive radio, collaborative spectrum sensing