

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Long Term Evolution (LTE)

Long Term Evolution (LTE) merupakan standar komunikasi radio yang didasarkan pada jaringan GSM/EDGE dan UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*)/HSDPA. LTE yang diperkenalkan pada *3rd Generation Partnership Project* (3GPP) *Release 8* merupakan pengembangan dari teknologi 3G menuju 4G. LTE dirancang untuk meningkatkan kapasitas dan kecepatan jaringan telepon *mobile*. Dengan teknologi ini, diharapkan lebih banyak *user equipment* (UE) yang mendapat layanan jaringan LTE. Spesifikasi teknis LTE ditunjukkan pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1
Spesifikasi Teknis LTE

Parameter Spesifikasi Teknis	Jenis/Nilai
<i>Peak data rate</i>	100 Mbps (<i>downlink</i>) 50 Mbps (<i>uplink</i>)
<i>Throughput</i> rata-rata per Mhz	3-4 kali (<i>downlink</i>) 2-3 kali (<i>uplink</i>)
<i>Bandwidth</i>	1,25–20 Mhz
Alokasi spektrum	FDD dan TDD
<i>Multiple Access</i>	OFDMA (<i>downlink</i>) SC-FDMA (<i>uplink</i>)
MIMO	2x2, 4x2, 4x4 (<i>downlink</i>) 1x2, 1x4 (<i>uplink</i>)
Modulasi	QPSK, 16QAM, 64QAM
<i>Latency</i>	5–100 ms
Rata-rata <i>user</i> tiap sel	200–400

Sumber: (Farooq Khan , 2009)

Sedangkan parameter layer fisik kanal *uplink* LTE ditunjukkan pada Tabel 2.2 dimana kategori LTE dapat dipilih sesuai *bandwidth* yang digunakan.

Tabel 2.2
Parameter Layer Fisik LTE

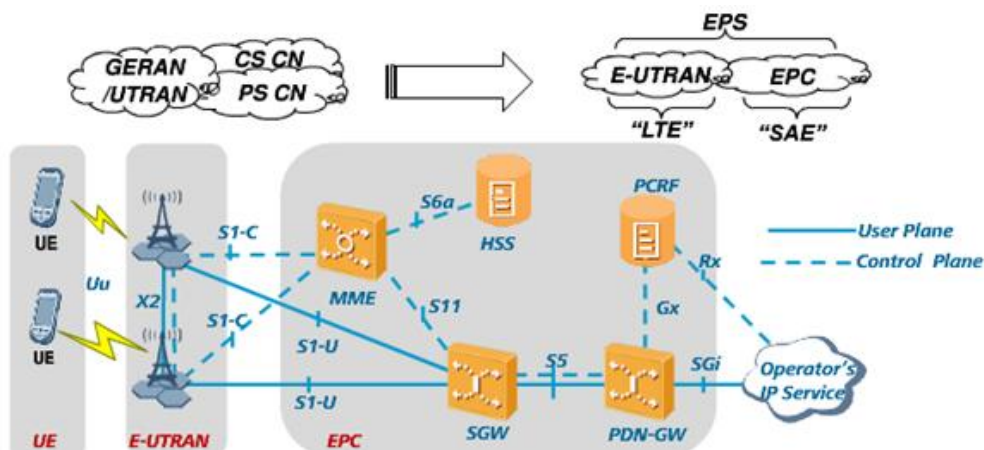
<i>Bandwidth</i> kanal (MHz)	1,25	2,5	5	10	15	20
Jumlah <i>subcarrier</i>	72	150	300	600	900	1200
Durasi <i>slot</i> (ms)	0,5					
Durasi <i>subframe</i> (ms)	1					
<i>Subcarrier spacing</i> (kHz)	15					
Modulasi	QPSK, 16QAM, 64QAM (<i>optional</i>)					
Frekuensi <i>sampling</i> (MHz)	1,92	3,84	7,68	15,36	23,04	30,72
Ukuran FFT	128	256	512	1024	1536	2048
Jumlah <i>resource block</i> (RB)	6	15	25	50	75	100
<i>Bandwidth</i> yang ditempati (MHz)	1,14	2,265	4,515	9,015	13,515	18,015
Ukuran <i>Cyclic Prefix</i> (CP)	5,2 μ s (simbol pertama) / 4,69 μ s (simbol lainnya)					

Bandwidth kanal (MHz)	1,25	2,5	5	10	15	20
pendek						
Ukuran <i>Cyclic Prefix</i> (CP) panjang	16,67 μ s					
Jumlah simbol per <i>subframe</i>	7/6 (CP pendek/panjang)					

Sumber: <http://www.embedded.com/print/4199671>

2.1.1 Arsitektur Jaringan LTE

Konfigurasi jaringan LTE Release 8 dikenal dengan *System Architecture Evolution* (SAE) dimana terdapat *Evolved Packet System* (EPS). EPS terdiri atas *Evolved Packet Core* (EPC) dan *Evolved UTRAN* (E-UTRAN). EPC dapat terhubung dengan jaringan radio lain, baik jaringan dengan standar 3GPP maupun bukan (Uke Kurniawan, 2013). LTE memiliki arsitektur jaringan yang ditunjukkan pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Arsitektur jaringan LTE

Sumber: <http://teknologi-4g-lte.blogspot.co.id>

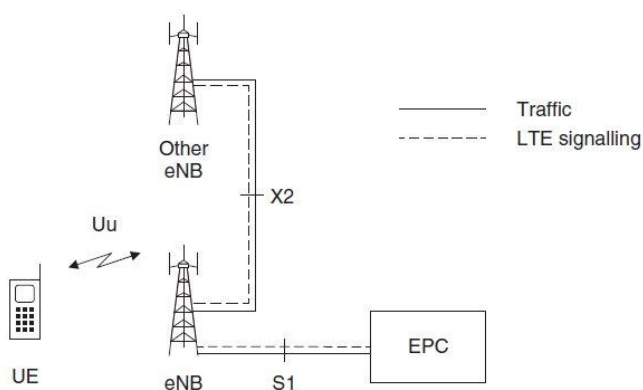
1. User Equeipment (UE)

UE merupakan perangkat yang digunakan oleh *user* untuk melakukan komunikasi. UE terdiri atas TE (*Terminal Equipment*) yang berfungsi sebagai terminal radio dan USIM (*Universal Subscriber Identity Module*) yang berfungsi sebagai identitas pengguna. USIM juga berguna sebagai *security key* untuk melindungi *interface* transmisi radio (Harri Holma, 2009).

2. E-UTRAN

E-UTRAN merupakan jaringan akses radio yang menyediakan koneksi antara UE dan EPC (*Evolved Packet Core*). E-UTRAN hanya terdiri dari eNodeB (*evolved NodeB*) yang ditunjukkan pada Gambar 2.2. eNodeB merupakan *host* dari layer fisik yang dapat mendukung mode *Frequency Division Duplex* (FDD), *Time Division Duplex* (TDD) atau

operasi *dual mode*. eNodeB juga berfungsi sebagai penyedia kompersi *header* IP dan enkripsi aliran data pengguna serta bertanggung jawab dalam *Radio Resource Management* (RRM) (Mustafa Ergen, 2009).



Gambar 2.2 Struktur E-UTRAN

Sumber: <http://telcoengineer.blogspot.co.id>

3. Evolved Packet Core (EPC)

EPC bertanggung jawab untuk pengontrolan secara menyeluruh dari eNodeB dan pembentukan *bearer*. EPC terdiri dari:

a. Policy Control and Charging Rules Function (PCRF)

PCRF bertanggung jawab untuk mengontrol aliran data berdasarkan *Policy Control Enforcement Function* (PCEF) yang terletak pada PDN-GW. PCRF menyediakan otorisasi *Quality of Service* (QoS) yang menentukan bagaimana aliran data tertentu akan diperlakukan dalam PCEF dan memastikan bahwa hal ini sesuai dengan profil *user*.

b. Home Subscriber Server (HSS)

HSS berfungsi untuk menyimpan data dan informasi mengenai *user* agar tersimpan secara permanen. HSS juga berisi rekaman lengkap tentang lokasi terkini dari *user*.

c. Packet Data Network Gateway (PDN-GW)

PDN-GW merupakan jangkar untuk mobilitas antara 3GPP dengan teknologi lain seperti WiMAX, 3GPP2, dan WLAN (*Wireless Local Area Network*) melalui beberapa *interface*. PDN-GW menyediakan konektivitas dengan jaringan paket data eksternal serta bertanggung jawab mengalokasikan alamat IP UE.

d. Serving Gateway (S-GW)

Semua pengguna paket IP dikirimkan melalui S-GW, yang berfungsi sebagai jangkar untuk mobilitas data *bearer* bila UE bergerak diantara eNodeB. S-GW juga

bertanggung jawab dalam menetapkan *routing* dan meneruskan paket data *user* dengan *interface* S-1, menangani kompresi *header* IP serta enkripsi data *user*.

e. *Mobility Management Entity* (MME)

MME adalah *node* kontrol yang memproses sinyal antara UE dan CN (*Core Network*)/ EPC. Selain itu MME juga berfungsi sebagai autentifikasi dan keamanan serta *mobility management*. Protokol yang berjalan antara UE dan CN dikenal sebagai protokol *Non-Access Stratum* (NAS) (Stefania Sesia, 2009).

Kapasitas jaringan LTE untuk tiap eNodeB dapat dihitung menggunakan Persamaan (2-1) sehingga untuk sistem 10MHz dengan N sebanyak 600 buah *subcarrier* didapat kapasitas sebesar 16,8 Mbps untuk QPSK dan 33,6 Mbps untuk 16QAM.

$$\text{peak bit rate} = N \times N_{\text{subcarriers}} \times N_{\text{symbol per subframe}} \dots\dots\dots(2-1)$$

Dengan:

Peak bit rate = kapasitas eNodeB tertentu (Mbps)

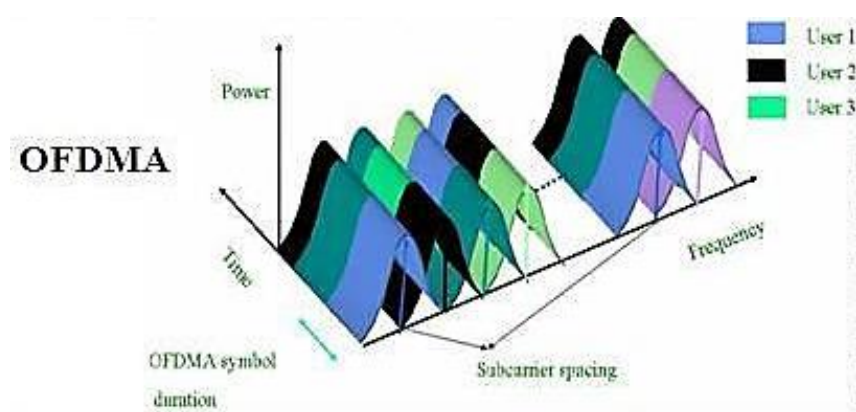
N = jumlah bit tiap simbol (bit/Hz)

$N_{\text{subcarriers}}$ = jumlah *subcarrier*

$N_{\text{symbol per subframe}}$ = jumlah simbol tiap *subframe* (bit/ms)

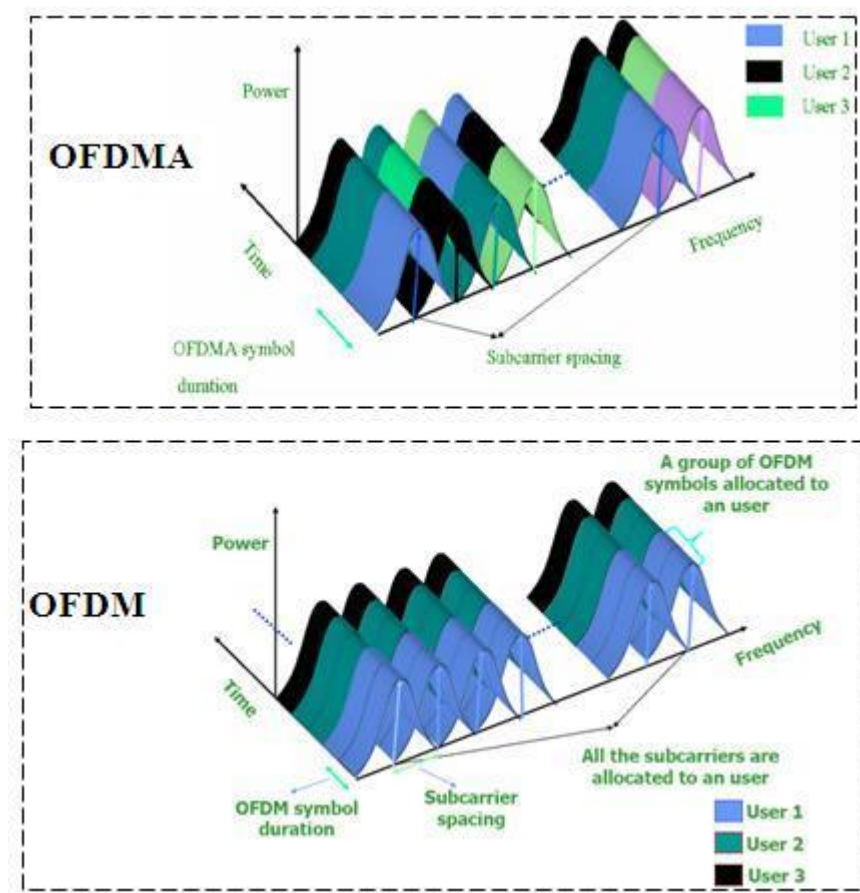
2.1.2 *Orthogonal Frequency Division Multiple Access* (OFDMA)

OFDMA pada dasarnya merupakan teknik akses yang mengalokasikan *user* pada *subcarrier* yang berbeda dan pada *time slot* yang berbeda pula. *Orthogonal* dalam hal ini berarti *subcarrier* yang berdekatan saling tegak lurus sehingga menunjang efisiensi *bandwidth* serta menghindari interferensi antara *subcarrier* yang berdekatan. Pengalokasian *user* pada *subcarrier* dan *time slot* yang berbeda dapat dilihat pada Gambar 2.3 (Srikanth,2007).



Gambar 2.3 Alokasi user pada *subcarrier* OFDMA
Sumber: Srikanth S., 2007

OFDMA merupakan teknik *multiple access* yang merupakan aplikasi dari teknologi *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM). Perbedaan mendasar antara OFDMA dengan OFDM adalah bahwa pada OFDMA dalam satu *subcarrier* diperbolehkan diduduki oleh satu atau beberapa *user* dengan simbol OFDMA yang berbeda. Sedangkan pada OFDM dalam satu *subcarrier* hanya diperbolehkan diduduki oleh *user* dengan simbol OFDM yang sama. Perbedaan antara OFDMA dan OFDM ditunjukkan Gambar 2.4 (Srikanth,2007).



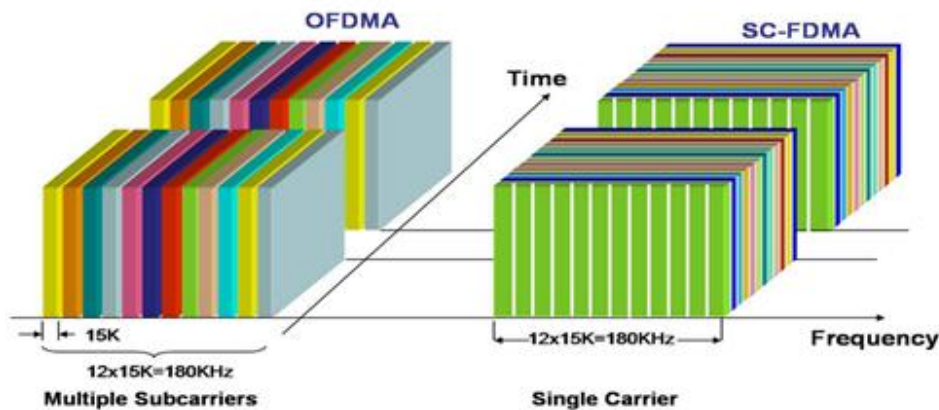
Gambar 2.4 Skema OFDMA dan OFDM
Sumber: Srikanth S., 2007

2.1.3 Single Carrier Frequency Division Multiple Access (SC-FDMA)

Single Carrier Frequency Division Multiple Access (SC-FDMA) adalah suatu teknik *multiple access* yang merupakan modifikasi dari teknologi OFDMA. Sama seperti OFDMA, sistem SC-FDMA membagi *bandwidth* transmisi menjadi beberapa *subcarrier* yang saling tegak lurus. (Harri Holma, 2009).

Perbedaan SC-FDMA dengan OFDMA yaitu data simbol pada OFDMA secara langsung dimodulasikan pada setiap *subcarrier* bebas dan ditransmisikan secara paralel

ditunjukkan pada Gambar 2.5. Sementara pada SC-FDMA, beberapa *subcarrier* akan membawa data simbol yang sama pada *time slot* lebih pendek. Pengaturan ini dapat mengurangi *envelope fluctuation* pada gelombang sinyal yang ditransmisikan. Maka teknik SC-FDMA memiliki kelebihan yaitu PAPR yang lebih rendah dibandingkan OFDMA (Hyung G. Myung, 2009). Maka 3GPP LTE mengadopsi SC-FDMA sebagai skema *uplink* menyesuaikan daya pada *handset*.



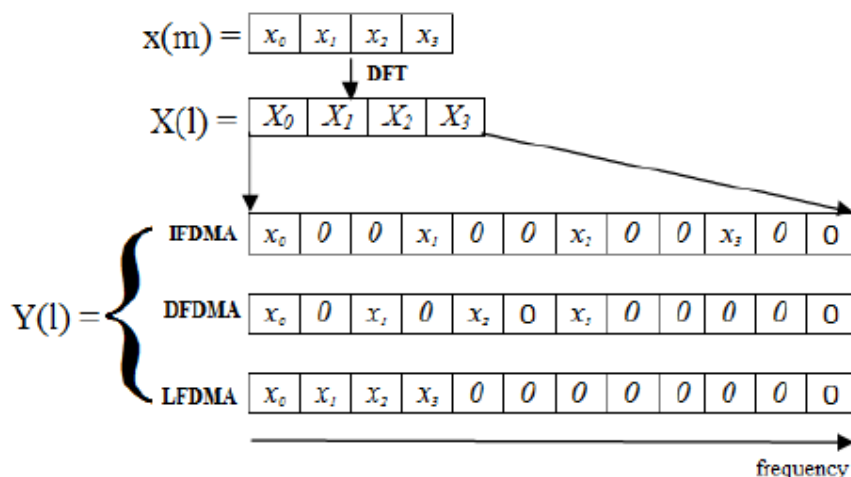
Gambar 2.5 Skema OFDMA dan SC-FDMA

Sumber: myelectronicnote.blogspot.co.id

Terdapat beberapa jenis *mapping* untuk memetakan sinyal pada SC-FDMA yaitu *Localized SC-FDMA* dan *Distributed SC-FDMA* dan *Interleaved SC-FDMA*.

1. *Localized SC-FDMA*, pada jenis ini sinyal dalam domain frekuensi akan dipetakan ke beberapa *subcarrier* secara mengelompok atau terlokalisasi.
2. *Distributed SC-FDMA*, pada jenis ini sinyal dalam domain frekuensi akan dipetakan ke beberapa *subcarrier* secara terdistribusi atau menyebar.
3. *Interleaved SC-FDMA* adalah kasus khusus dari *Distributed SC-FDMA*, dan sangat efisien karena pemancar dapat memodulasi sinyal dalam domain waktu tanpa penggunaan DFT dan IDFT (Myung, H. G., 2009)

Gambar 2.6 menunjukkan tiga contoh pengiriman simbol pada domain frekuensi SC-FDMA dengan $M = 4$ simbol/blok, $N = 12$ *subcarrier*, dan $Q=3$ terminal. Pada mode *localized*, empat modulasi simbol menempati *subcarrier* 0, 1, 2, dan 3; $Y_0=X_0$, $Y_1=X_1$, $Y_2=X_2$, $Y_3=X_3$. Pada mode *distributed* dengan modulasi simbol berjarak yang sama di semua *subcarrier* $Y_0=X_0$, $Y_2=X_1$, $Y_4=X_2$, $Y_6=X_3$. Sedangkan pada mode *interleaved* $Y_0=X_0$, $Y_3=X_1$, $Y_6=X_2$, $Y_9=X_3$.



Gambar 2.6 Skema mapping pada SC-FDMA

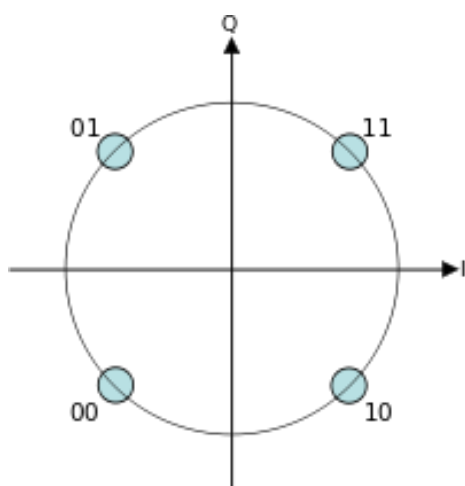
Sumber: <https://www.researchgate.net>

2.2 Modulasi pada LTE

Pada sistem LTE, sumber informasi yang digunakan adalah data digital maka digunakan modulasi digital M-ary. Modulasi yang digunakan yaitu QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*), 16-QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*), dan 64-QAM. Pada skema *uplink*, digunakan mode QPSK dan 16-QAM sementara 64-QAM bersifat *optional* karena hanya digunakan untuk *data rate* tinggi.

2.2.1 Quadrature Phase Shift Keying (QPSK)

QPSK merupakan bentuk lain dari modulasi PSK (*Phase Shift Keying*) yang memiliki 2 bit dalam tiap simbolnya (00, 01, 10, 11). QPSK menggunakan 4 titik pada diagram konstelasi dan menghasilkan 4 fasa keluaran yang berbeda. Penggambaran titik konstelasi pada QPSK ditunjukkan pada Gambar 2.7.

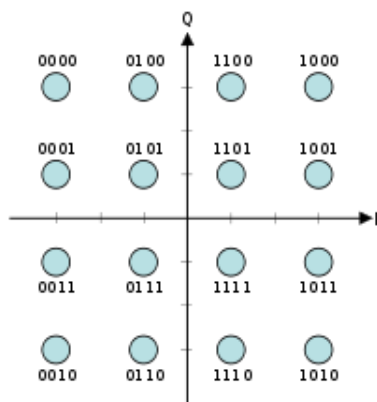


Gambar 2.7 Diagram konstelasi QPSK

Sumber: wikipedia.org

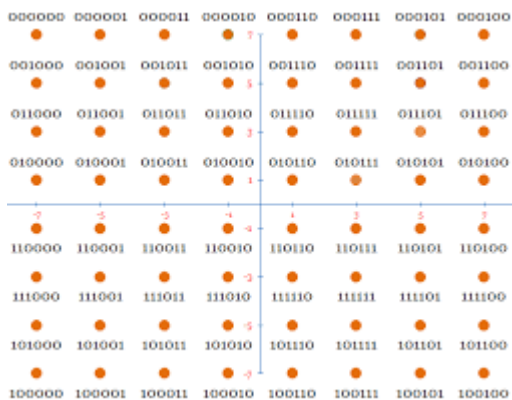
2.2.2 Quadrature Amplitude Modulation (QAM)

QAM merupakan teknik modulasi digital yang menggabungkan antara *Amplitude Shift Keying* (ASK) dan *Phase Shift Keying* (PSK). Pada QAM, amplitudo dan fasa sinyal *carrier* berubah terhadap perubahan amplitudo sinyal informasi. Sehingga sinyal direpresentasikan dalam besaran amplitudo yang berbeda dan pergeseran fasa. Dikatakan *quadrature* karena jumlah minimum bit pada setiap simbolnya adalah 2 bit. Sehingga pada QAM dikenal teknik 4-QAM, 8-QAM, 16-QAM, 32-QAM, 64-QAM, 128-QAM, dan 256-QAM tergantung dari jumlah banyaknya bit dalam satu simbol. Menurut standar 3GPP LTE, teknik QAM yang digunakan pada teknologi LTE adalah 16-QAM dan 64-QAM (K. Fazel, 2008). Penggambaran titik konstelasi pada 16-QAM ditunjukkan oleh Gambar 2.8 dan untuk 64-QAM ditunjukkan oleh Gambar 2.9.



Gambar 2.8 Diagram konstelasi 16-QAM

Sumber: en.wikipedia.org



Gambar 2.9 Diagram konstelasi 64-QAM

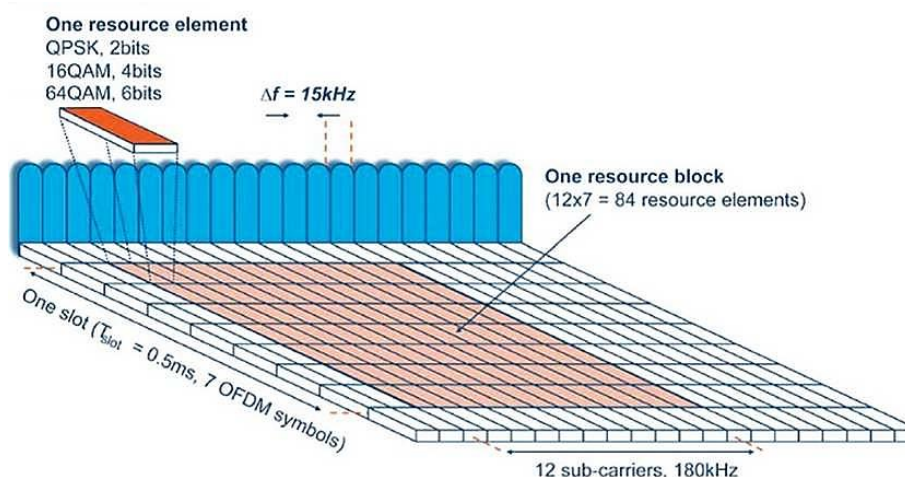
Sumber: www.gaussianwaves.com

16-QAM memiliki 4 bit pada setiap simbol sehingga disebut dengan *quadbit*. Sedangkan 64-QAM memiliki 6 bit pada setiap simbol sehingga disebut dengan *hexabit*. Teknik 64-QAM merupakan teknik yang paling cepat mentransmisikan data pada teknologi LTE, karena jumlah bit per simbolnya yang paling tinggi dibandingkan dengan teknik modulasi digital yang lain.

2.3 Alokasi Spektrum *Bandwidth*

2.3.1 *Resource Block (RB)*

Pada 3GPP LTE, struktur slot didefinisikan sebagai *resource grid* yang terdiri dari *resource block* (RB) yang menempati *bandwidth* sistem dan *time slot* tertentu. Sebuah RB menempati *bandwidth* 180kHz pada domain frekuensi dan 0,5 ms pada domain waktu. Sebuah RB memiliki 12 *subcarrier* dengan lebar *subcarrier* sebesar 15 kHz pada domain frekuensi, sedangkan pada domain waktu terdiri atas 7 buah simbol yang menempati 0,5 ms (Gambar 2.10). Pada LTE, terdapat dua RB pada *time slot* 1 *Transmission Time Interval* (TTI), dimana TTI adalah 1 ms (Dahlman,2008). RB adalah elemen dasar bagi penjadwalan pada sistem LTE dengan berbagai metode penjadwalan yang dapat diaplikasikan. Pada SC-FDMA, elemen RB tidak dapat dialokasikan secara terpisah untuk sebuah *user* karena memiliki karakteristik *single carrier* (Kim Jeongchan, 2012).



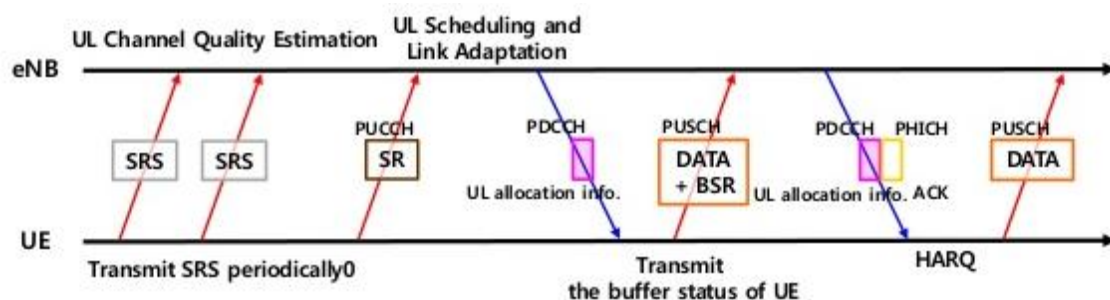
Gambar 2.10 Struktur *resource block* LTE
Sumber: <https://www.researchgate.net>

2.3.2 *Channel Dependent Scheduling (CDS)*

Teknologi akses SC-FDMA untuk *uplink* LTE dapat menjadwalkan *user* dalam dua dimensi yaitu frekuensi dan waktu seperti ditunjukkan pada Gambar 2.10. Unit terkecil

dalam *scheduling*/penjadwalan pada LTE adalah perpotongan antara 180kHz dengan 1 ms TTI atau dapat diartikan terdiri dari dua buah RB pada domain waktu.

Keputusan penjadwalan dilakukan oleh eNodeB, sedangkan kualitas kanal tiap TTI didapatkan dari *feedback* oleh *user*. *Packet scheduler* memutuskan *user* mana yang akan dilayani dan berapa RB yang ditugaskan untuk tiap *user*. Penugasan ini dilakukan dengan syarat bahwa RB yang ditugaskan untuk *user* harus berurutan pada domain frekuensi. Daya transmisi oleh *user* terdistribusi sama rata pada tiap RB yang ditugaskan (E.Yaacoub, 2009). Maka, jika jumlah RB yang ditugaskan lebih banyak akan mengakibatkan daya transmisi tiap RB yang lebih rendah. Gambar 2.11 menampilkan skema prosedur penjadwalan pada kanal *uplink* LTE secara ringkas.



Gambar 2.11 Skema *uplink* LTE

Sumber: <https://www.slideshare.com>

1. UE/*user* akan mentransmisikan sinyal *Sounding Reference Signal* (SRS) secara periodik kepada eNodeB untuk mengetahui kondisi kanal setelah mendapat alokasi SRS tiap *user*.
2. *Physical Uplink Control Channel* (PUCCH) mentransmisikan *Scheduling Request* (SR) dan info kanal.
3. eNodeB akan mengalokasikan *Physical Uplink Shared Channel* (PUSCH) dan *Buffer Status Report* (BSR) menurut kondisi kanal *user* melalui *Physical Downlink Control Channel* (PDCCH).
4. ACK (*acknowledgement*) akan ditransmisikan melalui *Physical Hybrid ARQ Indicator Channel* (PHICH) bersama dengan PDCCH.
5. Data akan ditransmisikan secara *uplink* dari *user* kepada eNodeB melalui PUSCH.

2.4 Kanal Propagasi

Kanal propagasi merupakan suatu media transmisi yang digunakan untuk mentransmisikan informasi dari pemancar ke penerima. Dalam sistem *wireless* terdapat dua macam gangguan yang dinilai memiliki efek terhadap sistem propagasi. Gangguan tersebut adalah:

1. *Noise* atau derau

Merupakan gelombang elektromagnetik alami yang dapat bercampur dengan sinyal informasi. Sehingga mempengaruhi besaran sinyal dimana magnitudo sinyal total per satuan waktu merupakan penjumlahan dari kedua sinyal.

2. *Fading*

Fading merupakan fluktuasi amplitudo sinyal secara cepat dalam periode satu waktu tertentu akibat banyaknya lintasan sinyal. Pada proses transmisi, sinyal yang sampai di penerima tidak hanya melewati satu jalur, tetapi datang dari berbagai jalur (*multipath*). Sinyal yang diterima merupakan penjumlahan dari keseluruhan sinyal (sinyal *Line of Sight* dan sinyal pantulan). Adanya *multipath fading* ini memungkinkan sinyal diterima meskipun lintasannya sempat terhalang, namun akan mempengaruhi penerimaan sinyal. Distribusi yang sering digunakan untuk menjelaskan bentuk sinyal pada kanal *multipath fading* adalah distribusi *Rayleigh Fading*.

2.4.1 Rugi-Rugi Propagasi

Level daya terima sinyal akan mengalami penurunan sesuai dengan bertambahnya jarak antara *user* dengan eNodeB pada beberapa kondisi lintasan. Terdapat dua kondisi yang menentukan rugi-rugi propagasi yaitu kondisi *Line of Sight* (LOS) dan *Non Line of Sight* (NLOS). Kondisi LOS merupakan kondisi dimana antara *user* dengan eNodeB tidak terdapat penghalang pada lintasan propagasi sinyal. Untuk kondisi LOS, rugi-rugi propagasi didefinisikan pada Persamaan (2-2).

$$L_p = -10 \log \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \dots\dots\dots (2-2)$$

Dimana λ adalah sebagai berikut:

$$\lambda = \frac{c}{f} \dots\dots\dots (2-3)$$

Dengan :

L_p = rugi-rugi propagasi (dB)

λ = panjang gelombang (m)

f = frekuensi kerja sistem (Hz)

d = jarak antara eNodeB dengan *user* (m)

c = kecepatan cahaya (3×10^8 m/s)

Sedangkan kondisi NLOS merupakan kondisi dimana antara *user* dengan eNodeB terdapat penghalang lintasan propagasi berupa gedung, pepohonan, dan sebagainya. Besar rugi-rugi propagasi untuk kondisi NLOS dapat ditentukan dengan Persamaan (2-4).

$$L_p = 40(1 - 4 \times 10^{-3} \Delta h_b) \log_{10} R - 18 \log_{10} \Delta h_b + 21 \log_{10} f + 80 \dots\dots\dots(2-4)$$

Dengan :

L_p = rugi-rugi propagasi (dB)

f = frekuensi kerja sistem (MHz)

R = jarak antara eNodeB dengan *user* (km)

Δh_b = tinggi eNodeB (m)

Setelah diperoleh nilai rugi-rugi propagasi LOS dan NLOS, maka dapat dihitung daya terima sinyal pada masing-masing kondisi lintasan (LOS dan NLOS) menggunakan Persamaan (2-5). Untuk N pada sistem ini sebanyak 600 *subcarrier* sedangkan daya terima, daya pancar, *gain* antena pemancar, *gain* antena penerima, *body loss*, dan *cable loss* mengacu pada spesifikasi LTE (Ketty, 2016).

$$P_r = P_t + G_t + G_r - L_p - 10 \log_{10} N - L_r - L_t \dots\dots\dots(2-5)$$

Dengan :

P_r = daya terima (dBm)

P_t = daya pancar (dBm)

G_r = *gain* antena penerima (dBi)

G_t = *gain* antena pemancar (dBi)

L_p = rugi-rugi propagasi (dB)

N = jumlah *subcarrier*

L_r = *body loss* (dB)

L_t = *cable loss* (dB)

2.4.2 *Signal to Noise Ratio* (SNR)

Signal to Noise Ratio (SNR) adalah perbandingan antara level sinyal dengan level *noise* yang dapat juga menunjukkan kualitas kanal. Semakin tinggi nilai SNR, maka semakin baik kualitas kanal tersebut. Nilai rata-rata SNR ditunjukkan pada Persamaan (2-6) (Mischa Schwartz, 1994). Sedangkan pengaruh dari jarak adalah pada perhitungan daya terima yang ditunjukkan pada Persamaan (2-2), (2-4), dan (2-5) yang menunjukkan bahwa semakin besar jarak, berimplikasi pada tingkat SNR semakin rendah.

$$SNR = 10 \log \frac{P_r}{N_0} \dots\dots\dots (2-6)$$

Dengan:

SNR = *signal to noise ratio* (dB)

P_r = daya yang diterima oleh penerima (mW)

N_0 = daya *noise* pada saluran transmisi (mW)

2.4.3 Kapasitas Kanal

Menurut Teorema Shannon, kapasitas kanal dengan *band* terbatas dapat dihitung dengan persamaan (2-7). Karena kapasitas dipengaruhi oleh tingkat SNR secara berbanding lurus, maka pengaruh peningkatan antara jarak pemancar dan penerima menyebabkan menurunnya kapasitas kanal.

$$C = B \times \log_2(1 + SNR) \dots\dots\dots (2-7)$$

Dengan:

C = kapasitas kanal (Mbps)

B = *Bandwidth*/ lebar kanal (Hz)

SNR = *Signal to Noise Ratio* (dB)

2.4.4 Bit Error Rate (BER)

BER (*bit error rate*) merupakan nilai ukur kualitas sinyal yang diterima untuk sistem transmisi data digital. BER juga dapat didefinisikan sebagai perbandingan jumlah bit *error* terhadap total bit yang diterima. Misalnya untuk BER maksimal 10^{-3} , maka dalam 1000 bit sinyal yang dikirimkan terdapat 1 bit yang salah. Nilai BER dipengaruhi oleh SNR sistem. BER dinyatakan dalam Persamaan (2-8) dan Persamaan (2-9) (Hara,2003).

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0}} \right) \dots\dots\dots (2-8)$$

$$BER \approx \frac{e^{-\left(\frac{E_b}{N_0}\right)}}{\sqrt{4\pi \frac{E_b}{N_0}}} \dots\dots\dots (2-9)$$

Dengan :

erfc = fungsi kesalahan dari variabel

E_b/N_0 = *energy per bit to noise power ratio* (dB)

2.4.5 Modulasi Adaptif

Kondisi kanal yang dapat berubah membutuhkan modulasi adaptif yang dapat menyesuaikan kondisi kanal. Modulasi adaptif diperlukan untuk mencapai kinerja yang maksimal dimana *trade off* antara laju bit maksimum dan BER dapat terjaga. Untuk mencapai suatu nilai minimum BER tertentu diperlukan nilai SNR yang berbeda untuk tiap modulasi. Target BER ditetapkan sebelumnya untuk mencapai laju bit maksimum. Misalkan, jika kondisi kanal baik maka dapat menggunakan modulasi dengan orde yang lebih tinggi untuk mencapai nilai laju bit maksimum. Untuk mencapai nilai BER 10^{-3} , modulasi QPSK memiliki nilai $(26,91 \leq \text{SNR} < 31,31)$ sedangkan modulasi 16QAM memiliki nilai SNR lebih dari 31,31 dB (Raka P. dkk, 2011).

2.5 Algoritma

Algoritma penjadwalan dapat didefinisikan sebagai algoritma yang menugaskan RB untuk melayani *user* menurut beberapa parameter atau metrik untuk mendapatkan performansi sistem yang baik pada kondisi tertentu (Cox, C., 2012). Terdapat beberapa tipe dari algoritma penjadwalan yang digunakan pada jaringan LTE. Beberapa algoritma penjadwalan tersebut memiliki tujuan yang berbeda dengan perspektif kualitas layanan yang berbeda. Pada penelitian ini digunakan jenis algoritma penjadwalan *Proportional Fair*.

2.5.1 Proportional Fair

Proportional Fair adalah sebuah pendekatan yang memilih level kanal yang paling baik dibanding level kanal rata-rata. Sistem ini menunjang *fairness* dengan memprioritaskan kanal dengan kualitas relatif yang lebih tinggi. Ide dasar dari algoritma ini adalah memilih *user* untuk dijadwalkan berdasarkan rasio antara *rate user-i* terhadap nilai rata-rata *rate* dari *user* aktif, ditunjukkan pada Persamaan (2-10). Secara spesifik, penjadwalan *Proportional Fair* akan memilih *user-i* jika (Dahlman, 2008):

$$user(i) = \max \frac{rate(i)}{\overline{rate}} \dots\dots\dots (2-10)$$

Dengan *rate* (Mbps) adalah kondisi kanal yang dipegaruhi oleh kapasitas kanal itu sendiri dan *i* adalah *user*. Jika dalam bentuk algoritma, maka akan dituliskan sebagai berikut dengan *m* adalah waktu pengamatan dan *n* adalah jumlah RB:

```
rate_rerata=mean(rate)
for m=1: jumlah TTI;
```

```

for n=1:jumlah RB
    if max((1/rate_rerata).*rate);
        alokasi user pada RB;
    end
end
end
end

```

Langkah pertama dalam perhitungan prioritas adalah menentukan *rate* rata-rata (Mbps) dari sistem yang didapat dengan menghitung mean dari *total rate user* (Mbps). Jumlah TTI (ms) menentukan waktu pengecekan kondisi kanal untuk pengalokasian sumber daya. Sedangkan jumlah RB menurut spesifikasi LTE pada sistem *bandwidth* 10MHz yaitu 50 buah. Penugasan RB untuk *user* ditentukan berdasarkan *rate user* maksimum dibandingkan *rate* rata-rata dari total *user*.

2.6 Parameter

2.6.1 Throughput

Throughput sistem adalah jumlah bit benar yang diterima dibandingkan dengan waktu pengiriman bit. Dimana waktu pengiriman bit adalah waktu mulai bit dikirim hingga waktu bit diterima.

$$Throughput = \frac{n}{t} \dots\dots\dots (2-11)$$

Dengan :

n = jumlah bit data diterima benar (bit)

t = waktu pengiriman data (ms)

Sedangkan *throughput* tiap *user* ternormalisasi dibuat dalam Persamaan (2-12). Dari persamaan ini akan ditentukan *user* pada sistem yang memiliki *throughput* ternormalisasi paling tinggi sebagai kemungkinan terbaik sebuah sistem dalam melayani *user*.

$$N_i = \frac{D_i}{\frac{1}{K} \sum_{i=1}^K D_i} \dots\dots\dots (2-12)$$

D_i = data rate yang diterima oleh *user-i* (Mbps)

K = jumlah *user*

2.6.2 Fairness

Fairness index suatu sistem ditentukan berdasarkan parameter *throughput* yang terukur pada masing-masing *user* yang dinormalisasi terhadap D_i. *Fairness index* memiliki rentang nilai antara 0–1 atau 0–100%. Semakin tinggi indeksinya, maka semakin adil (*fair*)

pula sistem tersebut. *Fairness Index* ditentukan berdasarkan Persamaan (2-13) berikut ini (Raj Jain, 1996):

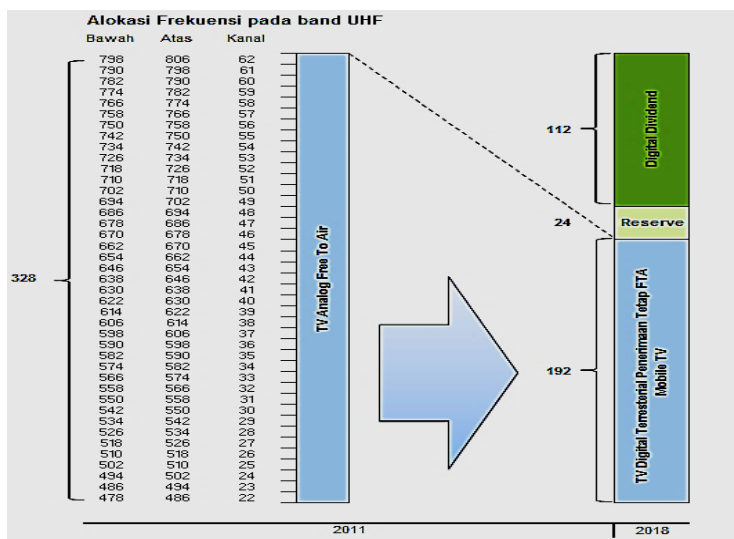
$$F = \frac{|\sum_{i=1}^K D_i|^2}{K \cdot \sum_{i=1}^K D_i^2} \dots\dots\dots (2-13)$$

D_i = data rate yang diterima oleh user- i (Mbps)

K = jumlah user

2.7 Digital Dividend

Sesuai dengan Permen Kominfo No.22/PER/M/KOMINFO/11/2011 tentang Penyelenggaraan Penyiaran Televisi Digital Terrestrial Penerimaan Tetap Tidak Berbayar (*Free To Air*), bahwa pada tahun 2018 semua TV analog migrasi secara penuh ke TV digital. Hal ini menyebabkan efisiensi layanan dengan alokasi spektrum frekuensi radio yang dapat dimanfaatkan untuk keperluan lain. Salah satu rencana pengalokasiannya oleh pemerintah ditunjukkan pada (Gambar 2.12) (Kemenkominfo, 2012).



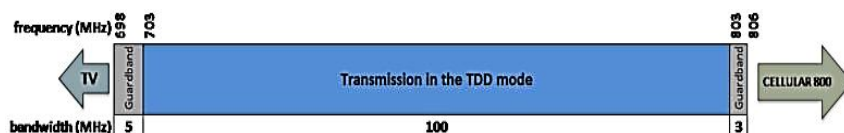
Gambar 2.12 Alokasi frekuensi pada pita UHF

Sumber: Kemenkominfo, 2012

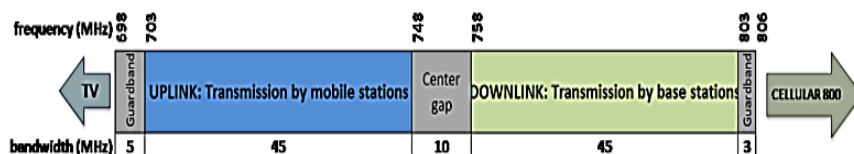
Pada Gambar 2.12 tersebut, alokasi Band UHF sebanyak 328 MHz yang terbagi dalam 40 kanal siaran, diperkecil alokasinya menjadi 192 MHz yaitu dari 478 MHz sampai 670 MHz. Sisa dari kanal berupa 24 MHz untuk *band* tidak terpakai. Sisanya 112 MHz dari 694 MHz sampai 806 MHz atau biasa disebut kanal 700 MHz merupakan kanal *digital dividend* yang rencananya akan dialokasikan untuk teknologi 4G LTE.

Menurut *Asia-Pacific Telecommunity (APT) band plan* di 700 MHz, alokasi sumber ini dapat dilakukan dengan skema TDD maupun FDD. TDD menggunakan *bandwidth* 100 MHz secara kontinyu (Gambar 2.13), sedangkan FDD membagi dua blok yaitu 45 MHz

untuk *uplink* dan 45 MHz untuk *downlink* yang dipisahkan oleh pita *center gap* sebesar 10 MHz (Gambar 2.14). Besarnya *guardband* pada FDD dan TDD 700 MHz yaitu 5 MHz dan 3 MHz masing-masing pada tepi atas dan bawah. Penggunaan *guardband* adalah untuk mengurangi interferensi frekuensi yang berdekatan. Sedangkan FDD *center gap* digunakan untuk menghindari interferensi transmisi antara *uplink* dan *downlink* (Ariyanti, 2013). Pada LTE 700 MHz FDD, kanal *uplink* menempati frekuensi 703-748 MHz.



Gambar 2.13 Segmentasi APT 700 MHz mode TDD
Sumber: (Ketty, 2016)



Gambar 2.14 Segmentasi APT 700 MHz mode FDD
Sumber: (Ketty, 2016)

2.8 Matlab (*Matrix Laboratory*)

Matlab merupakan integrasi dari komputasi, visualisasi, dan pemrograman dalam perangkat dimana permasalahan dan penyelesaian dinyatakan dalam notasi matematik yang sudah dikenal. Beberapa bagian yang penting di dalam Matlab yaitu:

1. Matematika komputasi.
2. Pengembangan algoritma.
3. *Modelling*, simulasi, dan pembuatan *prototype*.
4. Analisa data, eksplorasi dan visualisasi.
5. Pengetahuan dan grafik teknik.
6. Pengembangan aplikasi dan pembangunan GUI.

Matlab adalah sebuah sistem yang interaktif yang mempunyai elemen data dasar dalam bentuk *array*. Hal ini memungkinkan untuk menyelesaikan banyak persoalan komputasi teknik, khususnya dimana formulasi matrik dan vektor. Fitur Matlab disebut *toolboxes* yang merupakan koleksi komprehensif dari fungsi-fungsi Matlab (M-Files) yang menambah fasilitas Matlab untuk menyelesaikan beberapa bagian masalah secara khusus.

