

BAB II DASAR TEORI

2.1 KAJIAN PUSTAKA

Pada penelitian yang berjudul “**Efficient Design of Chirp Spread Spectrum Modulation for Low-Power Wide-Area Networks**”, penulis menjelaskan tentang pengembangan modulasi CSS dengan menggunakan modulasi *Phase Shift Keying* (PSK) dengan merancang sistem *Orthogonal Chirp Generator* (OCG). Pengimplementasian modulasi PSK pada CSS dapat mengeksploit sinyal agar dapat mengirimkan lebih banyak bit di dalam suatu simbol. Manfaat dari eksploitasi sinyal agar dapat mengirimkan sinyal tersebut mengakibatkan peningkatan pada kecepatan pengiriman data.

Pada penelitian yang berjudul “**Ultra-broadband Chirp Spread Spectrum Communication in the Terahertz Band**” membahas tentang perbandingan antara modulasi *Binary Chirp Spread Spectrum*(BCSS) dengan *Chirp Spread Binary Phase Shift Keying*(CSBPSK) yang menggunakan perubahan fasa untuk membedakan data bit “0” dan data bit “1”. Peneliti menggunakan *bandwidth* dan frekuensi yang sama pada kedua modulasi dan menyimpulkan bahwa *Bit Error Rate* (BER) pada BCSS memiliki nilai lebih tinggi dibandingkan dengan CSBPSK.

Pada penelitian yang berjudul “**Chirp Spread Spectrum For Narrow Band Long Range Bio Sensor Networks**” membahas tentang performa modulasi CSS pada alat biosensor. Peneliti menyebutkan bahwa pengujian di *Spreading Factor*(SF) 7 hingga 12. Peneliti menjelaskan tentang perbedaan SF yang dapat mempengaruhi *data rate* pada modulasi. Meningkatkan tingkat SF dapat mengurangi *data rate* sedangkan menurunkan tingkat SF dapat meningkatkan *data rate*. Peneliti juga menyimpulkan alat biosensor hanya menggunakan sedikit *data rate* sehingga meningkatkan SF tidak menjadi masalah meskipun *data ratenya* lebih kecil.

2.2 DASAR TEORI

2.2.1 Sistem Komunikasi

Sistem komunikasi selalu mempunyai 3 komponen dasar yaitu: *transmitter*, *channel* komunikasi sebagai media transmisi dan *receiver*.



Gambar 2.1 Blok Diagram Sistem Komunikasi [1]

Pada setiap sistem komunikasi analog maupun digital, sinyal informasi yang akan dikirim harus dimodulasi dengan sinyal pembawa agar dapat melewati media transmisi yang akan digunakan [1]. Pada gambar 2.1 menunjukkan sebuah diagram sederhana dari sistem komunikasi, yaitu *transmitter*, *channel*, dan *receiver*. Pada *transmitter* bertugas untuk mengirimkan suatu data atau informasi dengan memodulasikan data atau informasi dengan mengkodekan dengan metode tertentu agar dapat dikirimkan melalui *channel* atau media transmisi. Media transmisi ini dapat berupa fisik maupun non fisik. Pada bagian *receiver* bertugas untuk menerima sinyal yang terkirim oleh *transmitter* dan melakukan demodulasi agar dapat mengetahui data atau informasi asli yang sudah termodulasi.

2.2.2 Frekuensi LoRa

Setiap kawasan atau negara memiliki regulasi dalam penggunaan frekuensi LoRa yang berbeda-beda [2].

	Europe	North America	China	Korea	Japan	India
Frequency band	867-869MHz	902-928MHz	470-510MHz	920-925MHz	920-925MHz	865-867MHz
Channels	10	64 + 8 + 8				
Channel BW Up	125/250kHz	125/500kHz				
Channel BW Dn	125kHz	500kHz				
TX Power Up	+14dBm	+20dBm typ (+30dBm allowed)				
TX Power Dn	+14dBm	+27dBm				
SF Up	7-12	7-10				
Data rate	250bps- 50kbps	980bps-21.9kbps				
Link Budget Up	155dB	154dB				
Link Budget Dn	155dB	157dB				

Gambar 2.2 Alokasi Frekuensi LoRa di Berbagai Negara [2]

Alokasi frekuensi LoRa pada beberapa negara pada gambar 2.2 memiliki perbedaan karena setiap negara memiliki kebijakannya masing – masing tentang aturan penggunaan teknologi alat informasi. Apabila melihat gambar 2.2, frekuensi LoRa yang digunakan rata – rata menggunakan frekuensi diatas 500 MHz.

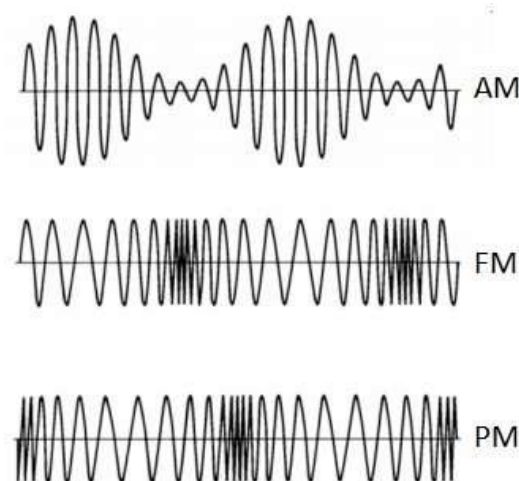
Indonesia sendiri menggunakan 920-923 MHz, sesuai dengan PM Kominfo No.1 2019 : Penggunaan Spektrum Frekuensi Radio Berdasarkan Izin Kelas dan PERDIRJEN SDPPI No 3 Tahun 2019: *LPWA Specification* [3].

2.2.3 Modulasi

Modulasi adalah suatu cara untuk mengirimkan suatu informasi dengan menumpangkannya ke sebuah sinyal radio sebagai sinyal pembawa. Gelombang pembawa ini biasanya berbentuk gelombang sinus dengan frekuensi yang tinggi. Dalam pengiriman dan penerimaan sinyal membutuhkan sistem untuk memodulasi sinyal agar dapat memodifikasi sinyal pembawa agar sesuai dengan data atau informasi yang akan dikirimkan. Pemodifikasian ini dapat berupa merubah amplitudo, frekuensi, dan fasa dari sinyal pembawa [4]. Modulasi dibagi dua, yaitu modulasi analog dan modulasi digital.

A. Modulasi Analog

Modulasi analog merupakan cara pengiriman sinyal informasi berbentuk analog yang ditumpangkan pada sinyal pembawa yang berbentuk analog juga. Dalam modulasi analog dibagi 3 jenis, yaitu *Amplitude Modulation* (AM), *Frequency Modulation* (FM), *Phase Modulation* (PM) [5].



Gambar 2.3 Varian Modulasi Analog

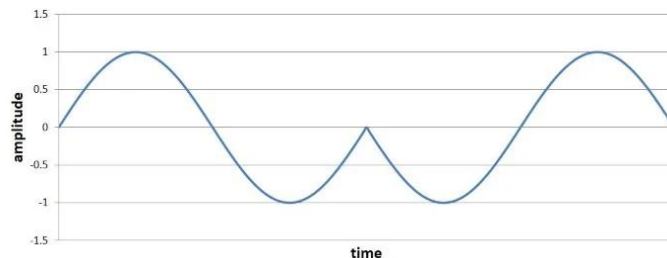
Gambar 2.3 menjelaskan perbedaan pada masing – masing modulasi analog AM, FM, dan PM. Pada modulasi AM, amplitudo dari sinyal pembawa menjadi tinggi dan rendah sesuai dengan sinyal informasi namun frekuensi dari sinyal tetap konstan. Pada modulasi FM, frekuensi dari sinyal pembawa menjadi renggang dan rapat sesuai dengan nilai dari sinyal informasi namun amplitudo dari sinyal pembawa tetap konstan. Pada PM, fasa dari sinyal informasi akan secara tidak langsung merubah frekuensi dari sinyal pembawa seiring dengan perubahan fasa dari sinyal informasi.

B. Modulasi Digital

Modulasi digital merupakan pengiriman sinyal informasi berbentuk digital yang berupa angka “1” dan “0” dengan cara memodifikasi sinyal pembawa baik dari bentuk amplitudo, frekuensi, dan fasa. Sinyal pembawa ini dirubah sedemikian rupa sehingga hasilnya berupa konversi dari nilai “0” dan “1” dari sinyal informasi tersebut. Modulasi digital dibagi 3 jenis, yaitu *Amplitude Shift Keying* (ASK), *Frequency Shift Keying* (FSK), dan *Phase Shift Keying* (PSK) [6].

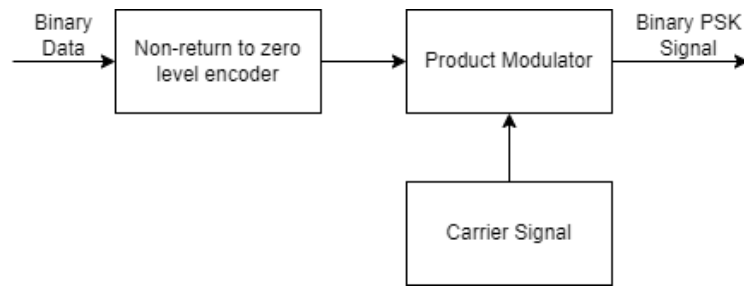
1. Binary Phase Shift Keying (BPSK)

BPSK adalah format paling sederhana dari PSK, yaitu menggunakan dua tahap terpisah sebesar 180° .



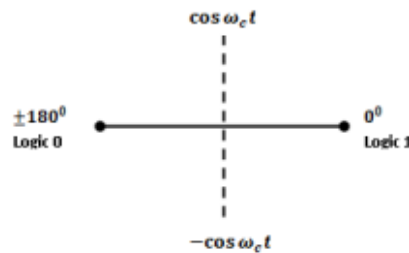
Gambar 2.4 Sinyal Modulasi BPSK [7]

Gambar 2.4 menggambarkan perubahan fasa dari sinyal pembawa yang telah termodulasi oleh sinyal informasi. Perbedaan fasa sinyal sebesar 180° pada gambar 2.4 dapat membedakan bentuk sinyal pada saat sinyal informasi memiliki nilai “0” atau “1”.



Gambar 2.5 Diagram modulasi BPSK [8]

Gambar 2.5 merupakan diagram dari pemodulasian BPSK. Untuk dapat mengeluarkan sinyal BPSK, *binary data* harus diproses sedemikian rupa agar dapat ditumpangkan pada sinyal pembawa. Sebelum proses penumpangkan pada sinyal pembawa, *binary data* akan dikodekan menggunakan *Non-Return to Zero(NRZ) level encoder* yang dimana didalamnya memiliki proses pembuatan sinyal diskret untuk modulasi digital. Setelah pengencodingan, sinyal baru bisa ditumpangkan karena sudah berbentuk gelombang diskret [8].



Gambar 2.6 Diagram Konstelasi BPSK [8]

Diagram konstelasi dari BPSK yang digambarkan gambar 2.6 sangat sederhana karena hanya terdapat dua titik yaitu “0” dan “1” yang terpisah sejauh 180° [8].

BPSK CSS menggunakan konsep dasar dari CSS yaitu mengirimkan *upchirp* (sinyal yang memiliki frekuensi yang meninggi seiring bertambahnya waktu) maupun *downchirp* (sinyal yang memiliki frekuensi yang menurun seiring bertambahnya waktu). Dalam pembentukan sinyal BPSK CSS ini memerlukan fasa untuk memodulasi sinyal sesuai dengan bit yang dikirimkan (1 atau 0). Rumus pada BPSK CSS merupakan perkembangan dari rumus 2.2, keduanya hanya memiliki perbedaan pada penambahan phi pada BPSK CSS. Penambahan phi ini bertujuan untuk memanipulasi sudut sinyal yang akan dibentuk. Perbedaan yang lain adalah penggunaan variabel kompleks pada rumus dasar CSS dengan BPSK CSS, pada BPSK CSS tidak menggunakan variabel kompleks karena *gain* dan sinyal *noise*

merupakan variabel riil, serta penggunaan variabel riil lebih mudah untuk dimanipulasi. Perhitungan dasar dari BPSK CSS adalah sebagai berikut:

$$s_m(t) = \sqrt{\frac{2}{T_s}} \cos(2\pi f_0 t - \pi \mu_0 t^2 + \phi_m), 0 \leq t \leq T_s \quad (2.1)$$

Dimana,

T_s = durasi dari sebuah *symbol* (sekon)

t = waktu (sekon)

f_0 = frekuensi sinyal (Hz)

ϕ_m = fasa dari *waveform* m

μ_0 = variabel independen

Disaat pengiriman sinyal *upchirp* maka, $f_0 = f_{\min}$ dan $\mu_0 = -\frac{B}{T_s}$. Dan untuk pengiriman sinyal *downchirp* maka, $f_0 = f_{\max}$ dan $\mu_0 = \frac{B}{T_s}$, dimana B adalah *bandwidth* yang dihasilkan dari pengurangan antara f_{\max} dan f_{\min} . f_0 dan μ_0 merupakan variabel independen yang disesuaikan dengan bit yang akan ditransmisikan melalui *upchirp* maupun *downchirp*. Berikut adalah perhitungan $s_1(t)$ dan $s_2(t)$ yang masing – masing merepresentasikan bit “0” dan bit “1” [15].

$$s_1(t) = \sqrt{\frac{2}{T_s}} \cos\left(2\pi f_{\min} t + \pi \frac{B}{T_s} t^2\right), \quad (2.2)$$

$$s_2(t) = \sqrt{\frac{2}{T_s}} \cos\left(2\pi f_{\min} t + \pi \frac{B}{T_s} t^2 + \pi\right) \quad (2.3)$$

Dimana,

T_s = durasi dari sebuah *symbol* (sekon)

f_{\min} = frekuensi awal (Hz)

B = *bandwidth* sinyal (Hz)

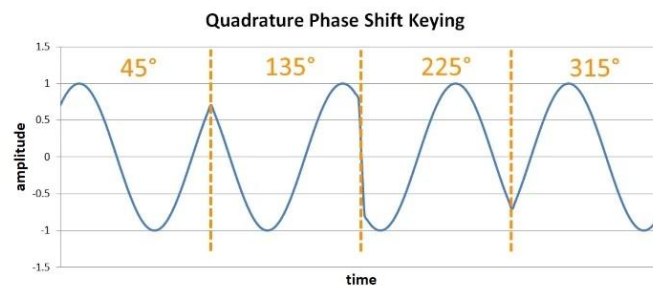
t = waktu (sekon)

Pada rumus 2.2, $s_1(t)$ merupakan bentuk sinyal *upchirp* yang merepresentasikan nilai bit “0”. Dimana $\sqrt{\frac{2}{T_s}}$ adalah amplitudo dari sinyal. Perhitungan $2\pi f_{\min} t$ adalah frekuensi awal yang mendandakan bahwa sinyal dimulai dari frekuensi rendah. $\pi \frac{B}{T_s} t^2$ merupakan *frequency sweep rate* dari sinyal yang akan menghasilkan *upchirp*. Pada rumus 2.3, $s_2(t)$ merupakan bentuk sinyal

upchirp yang merepresentasikan nilai bit "1". Dimana $\sqrt{\frac{2}{T_s}}$ adalah amplitudo dari sinyal. Perhitungan $2\pi f_{min}t$ adalah frekuensi awal yang mendandakan bahwa sinyal dimulai dari frekuensi rendah. $\pi \frac{B}{T_s} t^2$ merupakan *frequency sweep rate* dari sinyal yang akan menghasilkan *upchirp*. Simbol π menandakan bahwa sinyal digeser fasanya sebesar 180° .

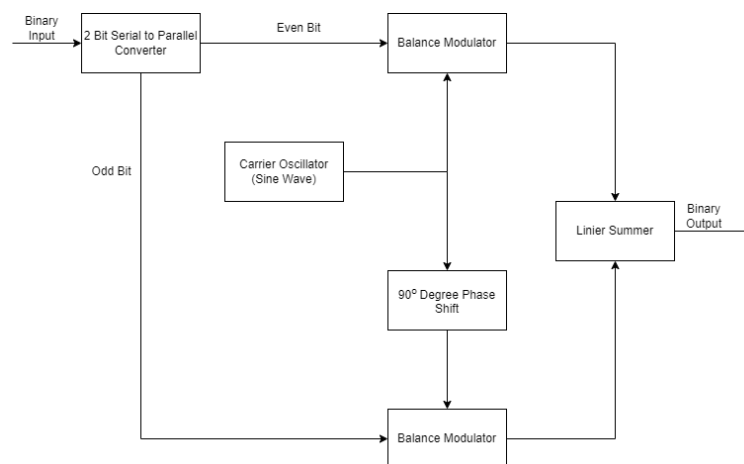
2. Quadrature Phase Shift Keying (QPSK)

Modulasi QPSK sering disebut sebagai 4-PSK, karena dapat mengirimkan dua simbol per bit. Hal ini berarti modulasi QPSK merupakan dua kali dari modulasi BPSK dari segi pengiriman data. Hal ini dapat menggandakan *data rate* jika dibandingkan dengan modulasi BPSK.



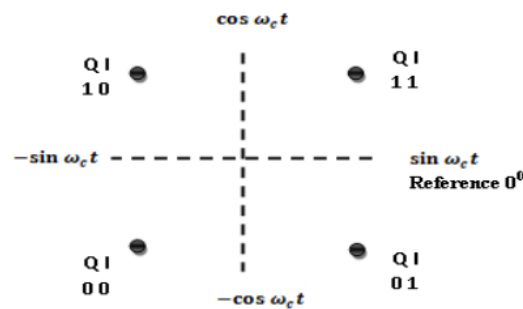
Gambar 2.7 Modulasi QPSK [7]

Pada gambar 2.7 modulasi QPSK terdapat empat kemungkinan pasangan bit, yaitu "00", "01", "10", "11". Tahap terpisah pada modulasi QPSK sebesar 90° , lebih kecil dibandingkan modulasi BPSK yaitu sebesar 180° [7].



Gambar 2.8 Diagram Modulasi QPSK [8]

Gambar 2.8 merupakan proses dari modulasi QPSK. Berbeda dengan modulasi BPSK, modulasi QPSK ini menggunakan 2 bit *serial to parallel converter* untuk memisahkan urutan dari bit ganjil dan genap sesuai *clocknya*. Bit ganjil akan dikalikan dengan sinyal pembawa yang digeser fasanya sebesar 90° , sedangkan untuk sinyal genap akan dikalikan dengan sinyal pembawa tanpa adanya pergeseran fasa. Selanjutnya hasil dari perkalian sinyal ganjil dan genap akan digabungkan menjadi sinyal QPSK yang utuh [8].



Gambar 2.9 Konstelasi Modulasi QPSK [8]

Konstelasi modulasi QPSK memiliki 4 titik karena hasil penggabungan antara sinyal ganjil dan genap dengan perbedaan fasa sebesar 90° pada masing – masing titik [8] yang ditampilkan pada gambar 2.9.

Mengacu pada gambar 2.5 yaitu skema modulasi QPSK yang terbagi menjadi 2 bentuk sinyal I dan Q, maka perhitungan dan rumus untuk QPSK CSS sedikit berbeda dengan perhitungan BPSK CSS. Pada perhitungan 2.4 dan 2.5 hanya merepresentasikan bit 0 dan 1. Sedangkan untuk QPSK CSS memiliki perhitungan sebagai berikut:

$$s_1(t) = \sqrt{\frac{2}{T_s}} \cos \left(2\pi f_{min} t + \pi \frac{B}{T_s} t^2 \right), \quad (2.4)$$

$$s_2(t) = \sqrt{\frac{2}{T_s}} \cos \left(2\pi f_{min} t + \pi \frac{B}{T_s} t^2 + \pi \right), \quad (2.5)$$

$$s_3(t) = \sqrt{\frac{2}{T_s}} \sin \left(2\pi f_{min} t + \pi \frac{B}{T_s} t^2 \right), \quad (2.6)$$

$$s_4(t) = \sqrt{\frac{2}{T_s}} \sin \left(2\pi f_{min} t + \pi \frac{B}{T_s} t^2 + \pi \right) \quad (2.7)$$

Dimana,

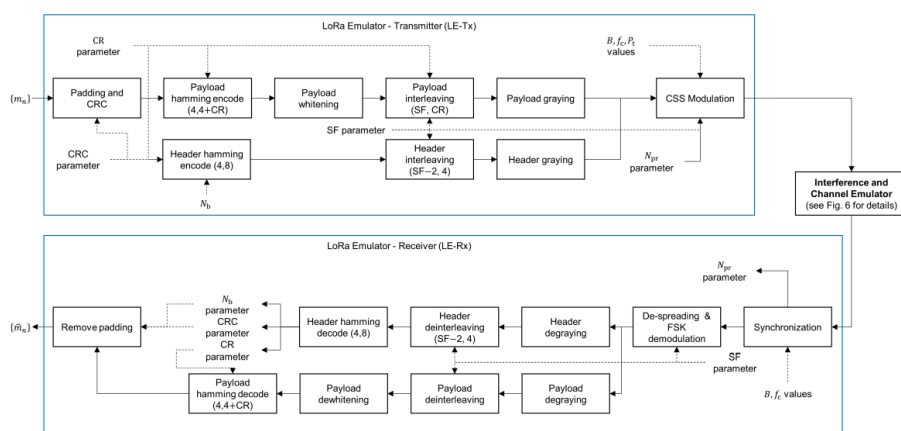
T_s = durasi dari sebuah *symbol* (Sekon)

f_{\min} = frekuensi awal (Hz)
 B = *bandwidth* sinyal (Hz)
 t = waktu (sekon)

Pada perhitungan 2.4 dan 2.5, $s_1(t)$ dan $s_2(t)$ merepresentasikan sinyal I. $\sqrt{\frac{2}{T_s}}$ adalah amplitudo dari sinyal. Perhitungan $2\pi f_{\min} t$ adalah frekuensi awal yang mendandakan bahwa sinyal dimulasi dari frekuensi rendah. $\pi \frac{B}{T_s} t^2$ merupakan *frequency sweep rate* dari sinyal yang akan menghasilkan *upchirp*. Simbol π yang ditambahkan pada rumus 2.5 menandakan bahwa sinyal digeser fasanya sebesar 180° . Rumus 2.6 dan 2.7 merupakan rumus yang merepresentasikan sinyal Q. rumus 2.6 dan 2.7 menggunakan \sin , dimana \sin memiliki perbedaan fasa sebesar 90° terhadap \cos . Apabila salah satu sinyal dari sinyal I dan Q digabungkan maka akan menghasilkan sinyal QPSK yang utuh.

2.2.4 Long Range (LoRa)

Long Range(LoRa) adalah teknik pengiriman sinyal menggunakan menggunakan modulasi CSS yang memungkinkan pengiriman data dengan jarak yang jauh namun dengan daya yang rendah. Implementasi dari teknologi LoRa adalah jaringan *Internet of Things*(IoT). Cara kerja LoRa menggunakan *gateway* sebagai gerbang untuk menerima data dari sensor yang ditanamkan atau diletakan pada suatu benda maupun makhluk hidup. Contoh lain dari pengimplementasian LoRa adalah *monitoring* hewan ternak, *monitoring* kondisi lingkungan, *smart lighting*, manajemen aset, dan lain – lain [9].



Gambar 2.10 Blok Diagram LoRa [10]

Gambar 2.10 merupakan blok diagram lora baik dari sisi pengirim maupun dari sisi penerima. Sinyal akan masuk ke parameter *coding rate* yang kemudian akan masuk ke *encode payload* untuk mengamankan data yang akan dikirim dan digabungkan dengan *Spreading Factor*(SF) sebelum nantinya akan dimodulasi oleh modulasi CSS [10].

Spreading Factor dapat diartikan banyaknya *bit* pada satu waktu. *Spreading Factor* yang lebih tinggi meningkatkan sensitivitas, dan jangkauan, tetapi juga meningkatkan *airtime* paket.

$$SF = \text{Log}_2\left(\frac{RC}{RS}\right) \quad (2.8)$$

Dimana,

SF = *Spreading Factor*

RC = *Chip Rate*

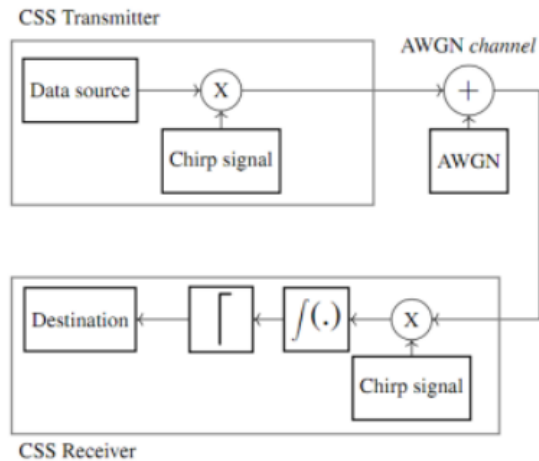
RS = *Symbol Rate*

Spreading Factor menunjukkan banyaknya chip yang digunakan untuk merepresentasikan 1 simbol, dengan faktor eksponensial 2, dimana 1 simbol dapat terdiri dari N chip dengan $N = 2^{SF}$. Nilai *Spreading Factor* yang digunakan pada komunikasi LoRa yaitu SF 7 sampai 12. SF memberikan pertukaran antara kecepatan data dan jangkauan melalui sensitivitas penerima yang lebih tinggi. *Symbol Rate* (RS) berperan sebagai laju perubahan *symbol* tiap satuan waktu dimana semakin cepat laju perubahan maka semakin kecil nilai *spreading factor* yang dihasilkan. Namun, semakin besar nilai *chip rate* maka berpengaruh terhadap nilai *spreading factor* yang semakin besar [14].

2.2.5 Modulasi *Chirp Spread Spectrum* (CSS)

Chirp Spread Spectrum (CSS) awalnya dikenal sebagai bentuk cara pemodulasian sederhana pada modulasi data biner. Karena pada data biner hanya ada 2 kemungkinan bentuk data informasi yaitu “0” dan “1” maka CSS menggunakan *upchirp* dan *downchirp* untuk menandakan masing – masing bentuk sinyal [11]. Modulasi CSS ini digunakan pada LoRa dengan lebar *bandwidth* sebesar 125kHz atau 500kHz. LoRa juga menggunakan *Spreading Factor*(SF) yang bertujuan untuk efisiensi daya yang dibutuhkan alat LoRa, karena apabila alat LoRa dekat dengan *gateway* maka hanya membutuhkan SF yang rendah sedangkan alat

LoRa yang jauh dengan *gateway* maka akan membutuhkan SF yang tinggi. Namun penggunaan SF dapat mempengaruhi performa dari pengiriman data, misalnya pada SF tinggi jarak yang ditempuh oleh sinyal lebih jauh namun *data ratenya* akan lebih lambat dibandingkan dengan SF rendah. Begitu juga sebaliknya, meskipun SF rendah memiliki *data rate* yang lebih tinggi namun memiliki cakupan sinyal yang lebih kecil dibandingkan dengan SF tinggi [12].



Gambar 2.11 Blok Diagram Modulasi CSS [13]

Gambar 2.11 merupakan blok diagram dari modulasi CSS baik dari sisi pengirim maupun sisi penerima. Pada sisi penerima mendapatkan *input* berupa *data source* yang selanjutnya akan masuk ke *chirp signal*. *Chirp signal* merupakan teknik penyebaran informasi berdasarkan domain frekuensi. Setelah melalui proses modulasi akan dikirim melewati kanal *Additive White Gaussian Noise* (AWGN). AWGN merupakan model kanal ideal pada sistem komunikasi yang hanya dipengaruhi oleh *thermal noise* [13].

CSS sendiri memiliki ciri khas bentuk sinyal yaitu linear secara *upchirp* dan *downchirp*, pada sinyal *upchirp* frekuensi akan meningkat seiring dengan berjalannya waktu dan sedangkan pada *downchirp* frekuensi akan merendah seiring dengan berjalannya waktu. Berikut adalah rumus dasar dari CSS:

$$c(t) = \begin{cases} e^{2\pi j(at+b)t}, & -\frac{T_s}{2} \leq t \leq \frac{T_s}{2} \\ 0, & \text{lainnya} \end{cases} \quad (2.9)$$

dengan $at+b = f_{\min} + \frac{f_{\max} - f_{\min}}{T_s} t$ [14].

Dimana,

T_s = durasi dari sebuah *symbol* (Sekon)

f_{\min} = frekuensi minimum (Hz)

f_{\max} = frekuensi maksimum (Hz)

t = waktu (sekon)

Rumus 2.1 juga dapat dirubah bentuknya sehingga menjadi seperti berikut:

$$c(t) = \cos(2\pi(f_{\min} + \frac{f_{\max} - f_{\min}}{T_s} t)t) + j \sin(2\pi(f_{\min} + \frac{f_{\max} - f_{\min}}{T_s} t)t) \quad (2.10)$$

Dimana,

T_s = durasi dari sebuah *symbol* (Sekon)

f_{\min} = frekuensi minimum (Hz)

f_{\max} = frekuensi maksimum (Hz)

Perhitungan $\frac{f_{\max} - f_{\min}}{T_s}$ adalah *frequency sweep rate*.

2.2.6 Bit Error Rate (BER)

Bit error rate (BER) merupakan perbandingan kesalahan bit pada saat data dikirimkan, BER berfungsi untuk menguji seberapa banyak kesalahan pembacaan pada sisi penerima [17]. Perhitungan BER memiliki rumus sederhana sebagai berikut.

$$\mathbf{BER} = \frac{\mathbf{Errors}}{\mathbf{Total\ Number\ of\ Bits}} \quad (2.11)$$

BER dihasilkan melalui jumlah *Errors* yaitu jumlah bit yang diterima memiliki kesalahan yang dibagi dengan *Total Number of Bits* yaitu total jumlah bit yang diterima.

Terdapat beberapa faktor yang dapat mempengaruhi nilai BER salah satunya adalah nilai *Signal to Noise Ratio* (SNR) [18].

$$\mathbf{BER} = \frac{1}{2} \mathbf{erfc}(\sqrt{E_b/N_0}) \quad (2.12)$$

Dimana,

E_b/N_0 = rasio dari energi per bit dengan kepadatan *noise* (dB)

\mathbf{erfc} = *error function* [19]

2.2.7 Bandwidth

Bandwidth merupakan lebar dari spektrum. Spektrum adalah lebar dari frekuensi yang menampung sinyal. Satuan dari *bandwidth* ini adalah Hertz (Hz)

atau Mega Hertz (MHz) [20]. Sebuah LoRa beroperasi pada 500 kHz, 250 kHz atau 125 kHz [21].

2.2.8 Data Rate

Data rate merupakan rate pengiriman dalam bentuk bit per detik (bps), pada data yang dapat dikirimkan dari satu perangkat ke perangkat lain. *Data rate* berbeda dengan *bandwidth* karena *bandwidth* merupakan kapasitas dari data yang dapat dikirimkan sedangkan *data rate* merupakan kecepatan dari pengiriman data [20]. Perhitungan data rate menggunakan perhitungan sederhana dibawah ini :

$$Data Rate = \frac{Jumlah\ bit}{Waktu} \quad (2.13)$$

Data rate dapat dihasilkan dengan cara jumlah bit yang diterima dibagi dengan waktu tempuh dari sinyal.