

## BAB II DASAR TEORI

### 2.1 KAJIAN PUSTAKA

Penelitian [6] pada tahun 2018 dengan judul “*Wireless Communication Based on Chirp Signals for LoRa IoT Devices*” menjelaskan tentang tentang sinyal *chirp* untuk komunikasi nirkabel antara perangkat *Internet of Thing* yang digunakan pada jaringan area luas berdaya rendah. Sebuah metode *decoding* simbol yang efisien secara perhitungan berdasarkan transformasi *Fourier* diskrit sebagai alternatif. Model simulasi LoRa yang diimplementasikan dalam matlab yang memungkinkan evaluasi sistem komunikasi berdasarkan tingkat kesalahan *bit* dan tingkat kesalahan paket. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa modulasi CSS parameter konfigurasi menghasilkan pertukaran informasi atau sinyal pada tingkat *biner*, dan mengakibatkan *link budget* antara modul LoRa dan *gateway*. Dapat disimpulkan keuntungan utama dari modulasi CSS pada LoRa dibandingkan dengan modulasi biner lainnya adalah *bandwidth* yang digunakan, penguraian simbol yang efisien secara perhitungan dan konsumsi daya.

Penelitian [7] pada tahun 2020 dengan judul “*A Scheme Using Up-chirp and Down-chirp for LoRa’s bit Synchronization and Carrier Restoration*” menjelaskan tentang metode sinkronisasi *bit* dan pembawa LoRa. Efek dari *time offset*, *carrier phase offset* (CPO) dan *carrier frequency offset* (CFO) pada penerimaan sinyal LoRa. Baik *time offset* dan CFO akan menyebabkan perubahan yang sesuai pada posisi nilai puncak pada *output* DFT, CPO hanya akan mengubah fase nilai puncak dan ditemukan bahwa CPO tidak mempengaruhi hasil akhir demodulasi. skema sinkronisasi menggunakan *upchirp* dan *downchirp* diusulkan, yang dapat memperoleh penundaan waktu dan CFO sinyal pada saat yang bersamaan. Meningkatkan durasi sinyal *Chirp* tunggal dalam pembukaan dapat meningkatkan akurasi estimasi penerimaan sinyal LoRa.

Penelitian [8] pada tahun 2021 dengan judul “*In-phase and Quadrature Chirp Spread Spectrum for IoT Communications*” menjelaskan tentang teknik *chirp spread spectrum* (CSS) berdasarkan kerangka kerja *physical layer* (PHY) *Long-Range* (LoRa).

LoRa PHY menggunakan CSS di atas varian *frequency shift keying* (FSK), dan deteksi *non-coheren* digunakan pada penerima untuk mendapatkan simbol data yang ditransmisikan. rancangan modulasi alternatif oleh LoRa PHY untuk aplikasi nirkabel yang membutuhkan konsumsi energi yang rendah dan *throughput* data yang lebih besar. Keuntungan utama dari *In-phase and Quadrature-phase Spreading Sequences* (IQCSS) terletak pada kemampuan untuk menggandakan *spectral efficiency* (SE), dan pada saat yang sama meningkatkan *energy efficiency* (EE) bila dibandingkan dengan CSS konvensional yang digunakan oleh LoRa dengan memanfaatkan informasi *phase* yang terkandung dalam pembukaan sinkronisasi LoRa.

Penelitian [1] pada tahun 2022 dengan judul “*Hybrid Chirp Signal Design for Improved Long-Range (LoRa) Communications*” menjelaskan tentang rancangan modulasi untuk komunikasi LoRa berdasarkan kicauan naik dan turun. Rancangan demodulasi berbasis transformasi *Fourier* cepat (FFT) dirancang untuk mendeteksi simbol yang dimodulasi. Demodulasi yang digunakan ada dua yaitu, pertama demodulasi berbasis FFT untuk modulasi LoRa berbasis kicauan naik dan turun dan kedua demodulasi hibrida untuk lebih meningkatkan kinerja demodulator berbasis FFT. Dengan dan tanpa gangguan, hasil simulasi menunjukkan bahwa skema yang diusulkan menunjukkan kinerja tingkat kesalahan *bit* yang lebih baik dibandingkan dengan skema modulasi LoRa konvensional.

Penelitian [9] pada tahun 2022 dengan judul “*Dual-Mode Chirp Spread Spectrum Modulation*” menjelaskan tentang modulasi *dual mode chirp spread spectrum* (DM-CSS) untuk jaringan area luas berdaya rendah. DM-CSS mampu mencapai efisiensi *spektral* (SE) yang lebih tinggi dibandingkan dengan modulasi yang lain, seperti modulasi *Long Range* (LoRa). DM-CSS hampir menggandakan jumlah *bit* yang ditransmisikan dalam satu simbol antara dua metode modulasi yang berbeda, yaitu modulasi DM-CSS dan modulasi LoRa. Dalam DM-CSS, yang merupakan varian yang lebih baik. Diperkirakan bahwa SE yang dapat dicapai dari DM-CSS dapat ditingkatkan dengan menggunakan tingkatan *chirp* yang berbeda.

## 2.2 DASAR TEORI

### 2.2.1 *Internet Of Things (IOT)*

IoT merupakan kepanjangan dari *internet of things* yang mana memiliki arti internet merupakan segalanya. Dalam hal ini bisa disimpulkan bahwa internet berperan penting dalam segala aktivitas dilakukan. Perkembangan teknologi di Indonesia semakin hari mengalami kemajuan hingga titik ini. Pertumbuhan pesat ini menghadirkan terobosan baru yang kamu bahkan sulit memikirkannya dan sangat berguna pada Indonesia.

IoT merupakan salah satu dari sekian banyak teknologi yang dikembangkan untuk menghadapi era digital seperti sekarang dan dapat memudahkan masyarakat dan pengguna ketika memakainya serta dapat mengatasi kesulitan berbasis digital tersebut. IoT terdiri dari sistem yang terhubung, sensor, antena ponsel otomatis, dan masih banyak lagi. Karena IoT menciptakan dan menganalisis data dalam jumlah besar, IoT merupakan mesin utama dari proyek analisis data besar. Pada Gambar 2.1 arsitektur IoT dapat terhubung dengan berbagai perangkat yang digunakan manusia [10].



**Gambar 2.1 Arsitektur IoT yang terhubung perangkat [10]**

### 2.2.2 *Software Defined Radio*

*Software Defined Radio* (SDR) atau dapat disebut juga dengan *software radio* ialah sebuah teknologi yang muncul untuk membangun sistem radio yang fleksibel, *multiservice*, *multistandard*, dan *multiband* dengan menggunakan *software*. Fleksibel berarti perangkat radio tersebut dapat diubah-ubah atau dimodifikasi karakteristiknya sesuai dengan sistem radio yang dikehendaki. *Multiservice* pengaplikasiannya seperti

radio yang dapat mengaplikasikan berbagai pelayanan atau *service* berupa suara, teks dan data. *Multistandard* pengaplikasiannya seperti perangkat radio tersebut dapat dioperasikan/diaktifkan pada *standard* radio yang berbeda, seperti GSM, AMPS, GPRS, DECT, GPS, dan CDMA. Untuk *Multiband* berarti dapat digunakan pada frekuensi kerja yang berlainan, seperti 800 MHz, 900 MHz, 2400 MHz, VHF, dan UHF [11].

### 2.2.3 RTL-SDR

*Software Defined Radio Realtek* (RTL-SDR) merupakan sebuah konsep yang telah merevolusi sistem komunikasi. SDR terdiri dari sebuah radio yang sebagian atau seluruh fungsi lapisan fisiknya ditentukan oleh perangkat lunak. Konsep ini memberikan keuntungan yang penting sebagai contoh, dengan SDR, tidak perlu mendesain *transceiver* baru untuk berkomunikasi pada beberapa pita frekuensi. RTL-SDR atau lebih dikenal dengan RTL *dongle* merupakan salah satu perangkat keras yang berfungsi sebagai pendukung SDR, namun hanya berperan sebagai *reciever*. Berikut ini adalah penampakan RTL-SDR *dongle* beserta dengan antenna bawaannya, seperti pada Gambar 2.2 [12].



**Gambar 2.2 RTL-SDR USB [12]**

### 2.2.4 Long Range (LoRa)

*Long Range* merupakan protokol transmisi sinyal radio yang menggunakan kicauan, format *multi*-simbol untuk menyajikan data. sistem tersebut yang dikembangkan oleh pembuat *chip Semtech*, LoRa *Semtech* merupakan *platform*

nirkabel jarak jauh berdaya rendah yang juga melisensikan *IP* LoRa-nya kepada pembuat *chip* lainnya. LoRa menggunakan *modulasi chirp spread spectrum* (CSS), yang mempertahankan karakteristik daya rendah yang sama dengan modulasi FSK, tetapi secara signifikan meningkatkan jangkauan komunikasi, *chip* ini adalah *chip* radio *band* ISM konvensional yang dapat mengubah frekuensi radio menjadi *bit* menggunakan LoRa (atau jenis modulasi lainnya seperti FSK) tanpa perlu menulis kode. Di luar komunikasi area luas, LoRa ialah teknologi lapisan fisik tingkat rendah yang dapat digunakan dalam berbagai aplikasi [13].

Transmisi menggunakan pita lebar untuk melawan interferensi dan untuk menangani *offset* frekuensi karena osilator kristal berbiaya rendah. Penerima LoRa memiliki sensitivitas yang sangat baik. Penerima dapat mendeteksi dan memahami sinyal transmisi yang memiliki tingkat sinyal yang 19,5 dB lebih lemah daripada tingkat kebisingan yang ada di lingkungan. Dengan demikian, jarak komunikasi yang sangat jauh dapat diatasi dengan menggunakan LoRa. Di Indonesia regulasi ini telah diatur oleh Kominfo dan akan mengikuti standar frekuensi LoRa yang ditetapkan oleh LoRa *Alliance* untuk kawasan Asia yaitu pada frekuensi 923–925 MHz (AS923). LoRa beroperasi pada pita ISM yang lebih rendah (UE: 868 MHz dan 433 MHz, AS: 915 MHz dan 433 MHz). pada Gambar 2.3 contoh *hardware* LoRa dengan tipe *shield* [14].



**Gambar 2.3 LoRa Shield [15]**

Radio LoRa memiliki empat parameter konfigurasi:

1. *Carrier Frequency*

*Carrier Frequency* (CF) merupakan frekuensi tengah yang digunakan untuk pita transmisi. Untuk SX1272, frekuensi ini berada pada kisaran 860 MHz hingga 1020

MHz, dapat diprogram dalam langkah 61 Hz. *Chip* radio alternatif *Semtech SX1276* memungkinkan penyesuaian dari 137 MHz hingga 1020 MHz.

## 2. *Spreading Factor*

*Spreading Factor* (SF) merupakan parameter yang digunakan untuk mengatur jarak antara *node* LoRa dan *gateway* LoRa. SF berfungsi sebagai faktor pengali yang digunakan untuk mengatur kecepatan data yang dikirimkan oleh *node* LoRa ke *gateway* LoRa.

## 3. *Bandwidth*

*Bandwidth* (BW) merupakan rentang frekuensi pada pita transmisi. BW yang lebih tinggi memberikan kecepatan data yang lebih tinggi (dengan demikian waktu mengudara yang lebih singkat), tetapi sensitivitas yang lebih rendah (karena integrasi derau tambahan). BW yang lebih rendah memberikan sensitivitas yang lebih tinggi, tetapi kecepatan data yang lebih rendah. BW yang lebih rendah juga membutuhkan kristal yang lebih akurat (lebih sedikit ppm). Data dikirim dengan kecepatan *chip* yang sama dengan *bandwidth*.

## 4. *Coding Rate*

*Coding Rate* (CR) merupakan tingkat *Forward Error Correction* (FEC) yang digunakan oleh modem LoRa dan menawarkan perlindungan terhadap semburan gangguan. CR yang lebih tinggi menawarkan perlindungan yang lebih besar, tetapi meningkatkan waktu mengudara. Radio dengan CR yang berbeda (dan CF / SF / BW yang sama), masih dapat berkomunikasi satu sama lain. CR dari muatan disimpan dalam *header* paket, yang selalu dikodekan pada 4/8 (kode informasi yang digunakan dalam modem LoRa) [15].

### 2.2.5 **Parameter LoRa**

Parameter LoRa merupakan suatu ukuran yang dapat menentukan performansi dari teknologi LoRa dan parameter LoRa yang digunakan pada penelitian ini terdiri dari *Bandwidth*, *Spreading Factor*, *Coding Rate*, *Received Signal Strength Indicator* (RSSI), dan *Signal to Noise Ratio* (SNR). *Bandwidth* merupakan kapasitas yang tersedia pada saat pengiriman dan penerimaan data dalam satuan *bit per second* (bps).

*Spreading factor* menentukan berapa banyak *chip* untuk merepresentasikan sebuah simbol. LoRa menggunakan *multiple orthogonal Spreading Factors* (antara 7 hingga 12). Banyaknya *chip* yang digunakan untuk mempresentasikan 1 simbol ditunjukkan dalam persamaan (2.1) *Spreading Factor* (SF) [16].

$$N = 2^{SF} \tag{2.1}$$

Dimana,

N = Jumlah *chip*

SF = *Spreading Factor*

Nilai *Spreading Factor* yang tinggi dalam komunikasi, meskipun menjanjikan jarak yang lebih jauh namun memiliki kelemahan yang signifikan, yaitu kecepatan data. Rumus di persamaan (2.2) dapat digunakan untuk menghitung kecepatan data lora yang muncul dengan RB dalam bps [17].

$$Rb = SF * \frac{\frac{4}{4+CR}}{\frac{2^{SF}}{BW}} * 100 \tag{2.2}$$

Dimana,

SF = *Spreading Factor*

CR = *Code Rate*

BW = *Bandwidth* (kHz)

*Received Signal Strength Indikator* (RSSI) merupakan ukuran kekuatan sinyal yang diterima oleh penerima dari pengirim. Ini adalah indikator kuat atau lemahnya sinyal yang diterima oleh perangkat penerima. RSSI berada di bawah batas derau, maka sinyal tidak dapat didemodulasi. Namun, LoRa dapat mendemodulasi sinyal yang berada di bawah batas derau. SNR minimum yang diperlukan untuk demodulasi pada faktor penyebaran yang berbeda ditunjukkan pada Tabel 2.1.

**Tabel 2. 1 Rentang *Spreading Factor* [18]**

<i>SpreadingFactor</i> (RegModulationCfg)	<i>Spreading Factor</i> (Chips / symbol)	<i>LoRa Demodulator</i> SNR
6	64	-5 dB
7	128	-7.5 dB
8	256	-10 dB
9	512	-12.5 dB
10	1024	-15 dB
11	2048	-17.5 dB
12	4096	-20 dB

Adapun faktor yang memengaruhi nilai RSSI di antaranya yaitu nilai *path loss*, antena *gain*, dan *cable loss*. Adapun rumus untuk menghitung nilai RSSI dapat menggunakan persamaan (2.3).

$$RSSI (dBm) = -10n \log_{10} (d) + A \quad (2.3)$$

Dimana,

A = kekuatan sinyal pada jarak satu meter dalam satuan dBm

n = nilai eksponen dari nilai *path loss*

*Signal-to-Noise Rasio* (SNR) merupakan rasio antara kekuatan sinyal yang diinginkan (sinyal) dengan kekuatan sinyal gangguan (*noise*) di lingkungan komunikasi. SNR mengGambar kan seberapa jelas sinyal terdengar dibandingkan dengan tingkat gangguan yang ada. Nilai SNR dapat ditentukan menggunakan persamaan (2.4) [19].

$$SNR = \frac{P_r}{P_n} \quad (2.4)$$

Dimana,

SNR = *Signal to Noise Ratio* (dB)

P<sub>r</sub> = daya yang diterima oleh *receiver*

P<sub>n</sub> = daya *noise* saluran transmisi

### 2.2.6 *Chirp Spread Spectrum*

*Chirp Spread Spectrum* (CSS), merupakan teknik modulasi yang digunakan dalam antena *Long Range* (LoRa) untuk komunikasi nirkabel jarak jauh. Teknologi



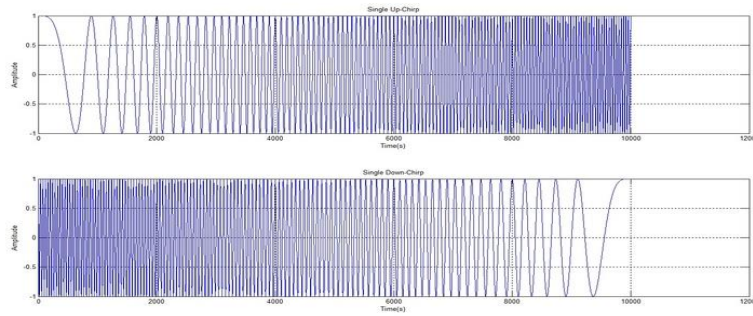
LoRa menggunakan modulasi *chirp spread spectrum* pada lapisan fisik (PHY) untuk mengirimkan sinyal-sinyal yang termodulasi. Dalam CSS, sinyal frekuensi berubah dari frekuensi terendah ke frekuensi tertinggi (*up-chirp*) atau dari frekuensi tertinggi ke frekuensi terendah (*down-chirp*) dalam waktu tertentu. Sinyal LoRa dalam *domain* waktu untuk satu periode simbol dapat dilihat pada persamaan (2.5) [20].

$$x_k(t) = \begin{cases} Ae^{j2\pi\left(\left(f_l + \frac{kB}{2S}\right)t + \frac{Bt^2}{2T}\right)} & \text{if } t \leq \tau \\ Ae^{2\pi\left(\left(f_l + \frac{kB}{2S} - B\right)t + \frac{Bt^2}{2T}\right)} & \text{if } t > \tau \end{cases} \quad (2.5)$$

Dalam modulasi CSS, S dimasukan ke dalam simbol modulasi LoRa, dimana S adalah faktor penyebaran. A dan T masing-masing mewakili amplitudo dan durasi simbol dari satu sinyal LoRa. *Bandwidth* dari sinyal LoRa didefinisikan oleh simbol B.  $f_h$  dan  $f_l$  masing-masing merupakan frekuensi maksimum dan frekuensi minimum. Waktu lompatan frekuensi dalam satu periode pada LoRa didefinisikan dalam simbol  $\tau$ .

### 2.2.7 Sinyal Up Chirp dan Down Chirp

Sinyal *Up Chirp* dan *Down Chirp* ialah jenis sinyal *chirp*, yang merupakan sinyal di mana frekuensi meningkat atau berkurang seiring waktu. Secara khusus, pada waktu kondisi *up chirp* berarti bahwa frekuensi sinyal meningkat seiring waktu, sedangkan pada waktu kondisi *down chirp* berarti bahwa frekuensi sinyal berkurang seiring waktu. Sinyal *up chirp* dan *down chirp* biasanya digunakan dalam sistem sonar, radar, dan *laser*, serta dalam komunikasi *spread-spectrum*[21]. Dalam sistem radar, frekuensi *linear* dimodulasi (LFM) *chirp* digunakan, yang dapat memiliki kemiringan frekuensi positif dengan waktu (*chirp* naik) atau kemiringan frekuensi negatif dengan waktu (*chirp* turun) Penerima harus dicocokkan dengan bentuk gelombang yang tepat. Sinyal *up chirp* dan *down chirp* dapat dihasilkan dengan menambahkan sinyal tegangan *ramp-up* dan *ramp-down linier* ke osilator yang dikontrol tegangan (VCO). Pada Gambar 2.4 dapat dilihat sinyal gelombang *up chirp* dan *down chirp* [22].



**Gambar 2.4 Sinyal Gelombang *Up* dan *Down Chirp* [22]**

### 2.2.8 Propagasi

Propagasi gelombang radio dapat diartikan sebagai proses perambatan gelombang radio dari pengirim ke penerima. Transmisi sinyal dapat dilakukan melalui media fisik, yang berupa kabel (*wire*) maupun media non-fisik (bukan kabel), yang lebih dikenal dengan *wireless*. Perambatan gelombang elektromagnetik menuju antenna penerima dapat melalui berbagai macam lintasan. Ada 3 jenis lintasan dasar yang dapat dilalui, yakni melalui permukaan tanah (gelombang tanah), melalui pantulan dari lapisan ionosfir dan troposfir di langit (gelombang langit), dan perambatan langsung dari antenna pemancar ke antenna penerima tanpa ada pemantulan (gelombang langsung). Pada Gambar 2.5 dapat dilihat beberapa jenis lintasan propagasi yang melalui mekanisme perambatan gelombang radio di udara bebas [23].

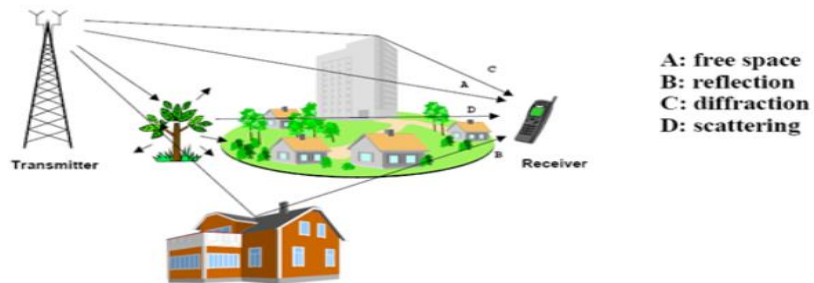


**Gambar 2.5 Propagasi Gelombang Radio [23]**

### 2.2.9 Perambatan Gelombang Elektromagnetik

Gelombang elektromagnetik merupakan gelombang yang tidak memerlukan medium dalam perambatannya, dan terdiri dari medan listrik dan medan magnet yang

saling tegak lurus dan merambat melewati suatu ruang. Ada beberapa mekanisme dasar perambatan gelombang elektromagnetik yang sering kita ketahui. *Free space loss* terjadi apabila sinyal pengirim sampai ke penerima tanpa hambatan. Refleksi terjadi jika sinyal mengenai objek yang mempunyai dimensi lebih besar dibandingkan panjang gelombang sinyal. Difraksi terjadi jika sinyal mengenai objek yang mempunyai bentuk yang tajam. *Scattering* terjadi jika sinyal mengenai objek yang mempunyai dimensi lebih kecil dibandingkan panjang gelombang sinyal. Menyebabkan energi menyebar ke segala arah. Pada Gambar 2.6 berbagai proses perambatan yang ada di lingkungan dari pengirim sampai ke penerima [24].



**Gambar 2.6 Fenomena Propagasi Gelombang Oleh Lingkungan [24]**

### 2.2.10 *Free Space Path Loss*

*Free-Space Path Loss* (FSPL) merupakan fenomena di mana energi sinyal radio menurun seiring dengan meningkatnya jarak antara *transmitter* (pengirim) dan *receiver* (penerima) dalam ruang bebas atau lingkungan tanpa penghalang atau refleksi signifikan. Fungsi FSPL sangat penting dalam perencanaan jaringan nirkabel dan komunikasi radio karena membantu memprediksi seberapa kuat sinyal akan saat mencapai *receiver* pada jarak tertentu dari *transmitter*. Untuk mengukur FSPL dapat dilihat pada persamaan (2.6) [25].

$$FSPL(db) = 10 \log_{10} \left( \frac{4\pi df}{c} \right)^2 \tag{2.6}$$

Dimana,

d = Jarak (m)

f = Frekuensi (Hz)

$c$  = Kecepatan Cahaya (m/s)

Biasanya, Persamaan FSPL (*Free-Space Path Loss*) selanjutnya dapat disederhanakan sebagai berikut persamaan 2.7.

$$\begin{aligned} FSPL(db) &= 20 \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f) + 20 \log_{10}\left(\frac{4\pi}{c}\right) \\ FSPL(db) &= 20 \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f) - 147.55 \end{aligned} \tag{2.7}$$

Penggunaan persamaan (2.7), dimana  $d$  dalam bentuk m,  $f$  dalam bentuk Hz, dan  $c$  yaitu kecepatan cahaya ( $3 \times 10^8$  m/s).

### 2.2.11 Konvolusi Sinyal Diskrit

Konvolusi merupakan operasi matematika yang menggabungkan dua sinyal untuk membentuk sinyal ketiga atau baru. konvolusi sangat penting karena menghubungkan sinyal masukan dan respon impuls sistem untuk menghasilkan sinyal keluaran dari sistem. konvolusi sinyal diskrit digunakan untuk menganalisis sistem *Linear Time Invariant* (LTI). Untuk mengukur konvolusi sinyal diskrit dapat dilihat pada persamaan (2.8) [26].

$$x(n) * h(n) = \sum_{-\infty}^{\infty} x(k)h(n - k) \tag{2.8}$$

Di mana:

$x(n)$  = sinyal *input*.

$h(n)$  = respons impuls sistem.

$k$  = indeks penjumlahan yang mencakup semua nilai diskrit dari  $-\infty$  hingga  $\infty$ .

### 2.2.12 Inverse/Fast Fourier Transform

Proses *Inverse Fast Fourier Transform* (IFFT) dan *Fast Fourier Transform* (FFT) merupakan kunci utama dalam sistem komunikasi. FFT mengubah sinyal dari *domain* waktu ke *domain* frekuensi. IFFT mengubah sinyal dari domain frekuensi ke *domain* waktu. Keduanya dalam proses tersebut penting dalam analisis dan pemrosesan sinyal, memungkinkan konversi yang efisien antara representasi waktu dan frekuensi

dari suatu sinyal. Untuk persamaan FFT (2.8) dan IFFT (2.9) dapat dituliskan rumus sebagai berikut [27].

FFT:

$$x(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \sin\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) + j \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cos\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) \quad (2.8)$$

IFFT:

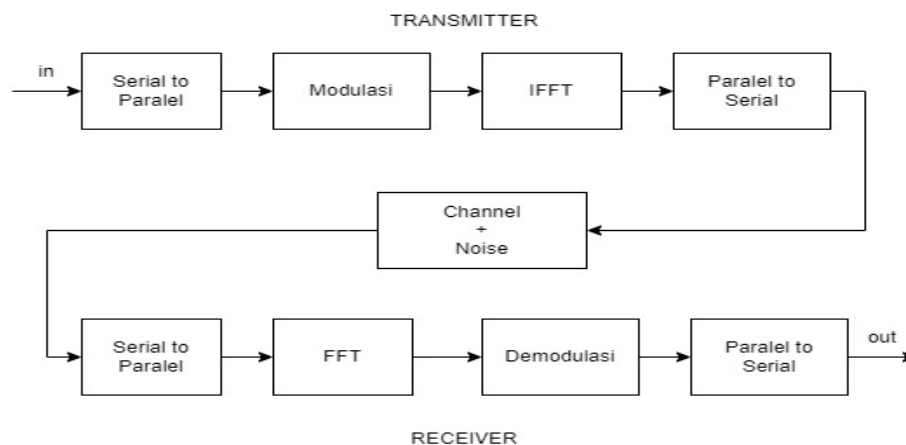
$$X(n) = \sum_{k=0}^{N-1} x(k) \sin\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) - j \sum_{k=0}^{N-1} X(k) \cos\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) \quad (2.9)$$

Dimana,

$x(n)$  = deretan data masukan ke-n

$X(k)$  = deretan data keluaran ke-k

*Fast Forier Transform* dan *Inverse Fast Fourier Transfrom* sering terjadi di beberapa sistem komunikasi seperti pada sistem modulasi OFDM, pengolahan suara, dan sistem komunikasi telepon. Berikut adalah salah satu penerapan FFT dan IFFT pada blok diagram sistem komunikasi yang terdapat seperti Gambar 2.7.



**Gambar 2.7 Blok Diagram Sitem Komunikasi**

### 2.2.13 Demodulasi Berbasis FFT

Teknik demodulasi berbasis FFT untuk modulasi LoRa berbasis *up* dan *down chirp*. Pada sisi penerima, sinyal yang diterima pertama dikalikan dengan sinyal *down chirp* asli yang disinkronkan dan kemudian dengan sinyal *up chirp* asli yang disinkronkan. Bahwa sinyal yang diterima sesuai dengan simbol yang ditransmisikan berdasarkan *chirp* yaitu ( $k < 2^{S-1}$ ). Dengan tidak adanya *noise* dan interferensi, sinyal yang diterima bisa dilihat pada persamaan (2.10) [1].

$$y_k(t) = \begin{cases} Ae^{2\pi(f_l + \frac{kB}{2^{S-1}} + \frac{B}{T}t)t} & \text{if } t \leq \tau_{ku} \\ Ae^{2\pi(f_l + \frac{kB}{2^{S-1}} - B + \frac{B}{T}t)t} & \text{if } t > \tau_{ku} \end{cases} \quad (2.10)$$

Ketika sinyal yang diterima dikalikan dengan sinyal *up chirp* asli yang disinkronkan  $Ae^{j2\pi(f_l t + \frac{Bt^2}{2T})}$  sinyal yang dihasilkan pada persamaan (2.11).

$$z_{ku}(t) = \begin{cases} A^2 e^{2\pi(2f_l + \frac{kB}{2^{S-1}} + 2\frac{B}{T}t)t} & \text{if } t \leq \tau_{ku} \\ A^2 e^{2\pi(2f_l + \frac{kB}{2^{S-1}} - B + 2\frac{B}{T}t)t} & \text{if } t > \tau_{ku} \end{cases} \quad (2.11)$$

Apabila sinyal yang diterima dikalikan dengan sinyal *down chirp* asli yang disinkronkan, maka frekuensi sinyal yang dihasilkan pada persamaan (2.12).

$$z_{kd}(t) = \begin{cases} A^2 e^{2\pi(f_l + f_h + \frac{kB}{2^{S-1}})t} & \text{if } t \leq \tau_{ku} \\ A^2 e^{2\pi(f_l + f_h + \frac{kB}{2^{S-1}} - B)t} & \text{if } t > \tau_{ku} \end{cases} \quad (2.12)$$

Dimana,

$z_k$  = Representasi *domain* frekuensi (*frequency domain*)

$f_l$  = Frekuensi minimum (Hz)

$f_h$  = Frekuensi maksimum (Hz)

$k$  = Estimasi dari indeks simbol

$S$  = *Spreading Factor*

$A$  = Amplitudo (*Volt*)

$f$  = frekuensi (Hz)

$t$  = waktu (s)

$T$  = durasi simbol satu sinyal LoRa (s)

Dengan memeriksa puncak spektrum frekuensi yang diperoleh, dapat menentukan bahwa sinyal yang diterima sesuai dengan sinyal yang dipancarkan berbasis *up chirp*. Secara sistematis prosesnya dapat dijelaskan sebagai berikut. Dengan menentukan indeks simbol ( $\hat{k}_u$ ) dari simbol yang ditransmisikan berbasis sinyal *up chirp* dan amplitudo yang sesuai ( $F_{k^d}$ ) dengan persamaan (2.13).

$$\begin{aligned}\hat{k}_u &= \operatorname{argmax} F(z_{ku}(t)) - f_l - f_h \\ F_{k^u} &= \max(F(z_{ku}(t)))\end{aligned}\tag{2.13}$$

Untuk simbol yang ditransmisikan berbasis sinyal *down chirp* dan *amplitude* yang sesuai ( $F_{k^d}$ ) dengan persamaan (2.14).

$$\begin{aligned}\hat{k}_d &= \operatorname{argmax} F(z_{kd}(t)) - f_l - f_h \\ F_{k^d} &= \max(F(z_{kd}(t)))\end{aligned}\tag{2.14}$$

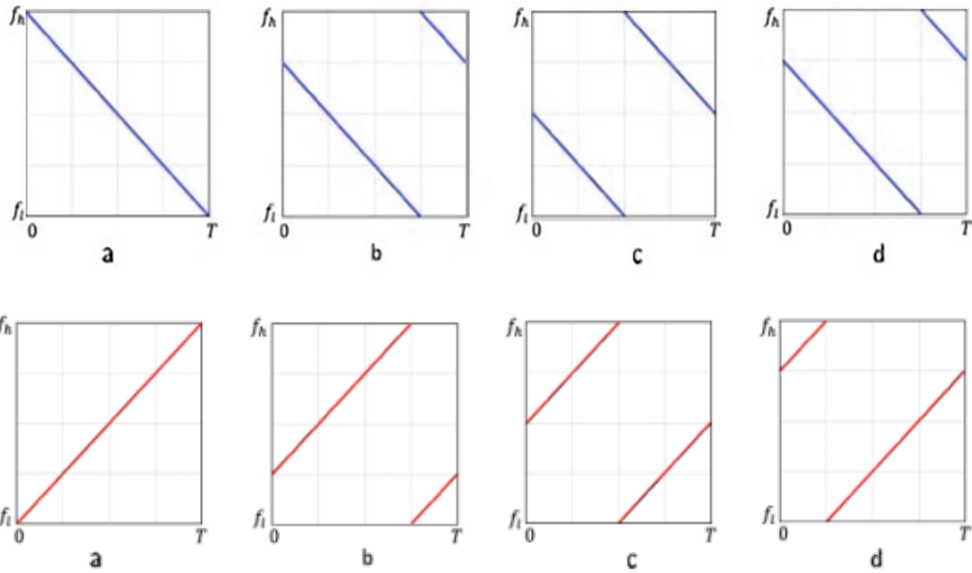
Perkiraan indeks simbol yang ditransmisikan seperti pada persamaan (2.15).

$$\hat{k} = \operatorname{argmax}(F_i)\tag{2.15}$$

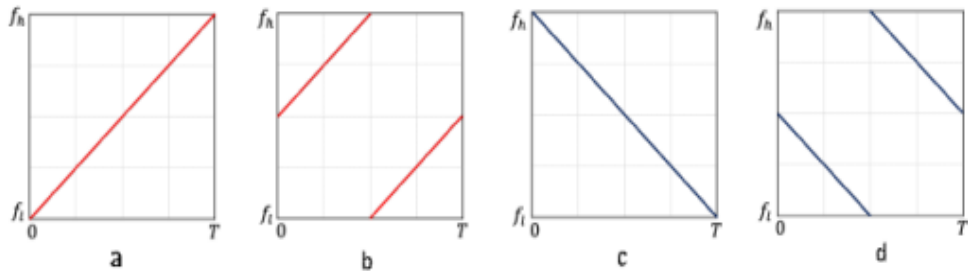
Dari rumus demodulasi *Fast Fourier Transform* (FFT) dapat digunakan untuk menghitung nilai suatu gelombang sinyal [28].

### **2.2.14 Metode Hybrid**

Metode *hybrid* pada komunikasi LoRa dengan teknik *cross correlation* dan *Fast Fourier Transform* (FFT) adalah pendekatan untuk meningkatkan efisiensi, ketahanan terhadap interferensi, dan kinerja komunikasi LoRa. Metode *hybrid* merupakan gabungan sinyal *up chirp* dan *down chirp* yang dikirimkan ke penerima. Berbeda dengan LoRa Konvensional merupakan sinyal yang dikirimkan hanya *up chirp* atau *down chirp* selama pengiriman. Dengan menggunakan metode *hybrid* membantu dalam mendeteksi dan memproses sinyal LoRa. Perbedaan metode *hybrid* dengan LoRa konvensional dapat dilihat pada Gambar 2.8 dan Gambar 2.9 [29].



**Gambar 2.8** LoRa Konvensional dengan Sinyal *Up* atau *Down Chirp*



**Gambar 2.9** Metode *Hybrid* dengan Gabungan Sinyal *Up* dan *Down Chirp*

### 2.2.15 Cross Correlation

Korelasi Silang (*Cross Correlation*) pada konteks *Digital Signal Processing* merupakan sebuah metode untuk mencari hubungan keselarasan dua sinyal. Dua sinyal dikatakan memiliki hubungan keselarasan jika perilaku sinyal yang satu mempengaruhi sinyal yang lain. Jika tidak terjadi, maka kedua sinyal tersebut saling independen. pada dasarnya korelasi silang bermaksud untuk mencari kesamaan (*similarity*) atau hubungan dari data yang kita miliki. *cross correlation* dapat digunakan untuk menghitung beda pergeseran antara dua sinyal. Ketika hasil *cross correlation* bernilai negatif maka disebut *lag*, namun jika hasilnya bernilai positif maka disebut *lead*. Untuk mengetahui lebih lanjut tentang rumus *cross correlation* dapat dilihat pada persamaan (2.16) [30].



$$R_{xy}(m) = \sum_{n=1}^{N-m} x(n+m)y(n)$$

$$R_{yx}(m) = \sum_{n=1}^{N-m} x(n)y(n+m)$$

$$R_{xy}(-m) = R_{yx}(m)$$

(2.16)

Dimana,

$m$  = *time lag*

$N$  = *number of sample*

$n$  = *matrix index*

$R$  = *correlation coefficient*