

## 用于提升信道容量的新型 MSFCSK-Chirp 调制方式

修梦雷, 窦高奇, 柳春恺

(海军工程大学电子工程学院, 湖北 武汉 430033)

**摘 要:** Chirp 调制凭借其独特的线性调频方式, 成为低功耗广域网物理层采用的关键技术。然而, Chirp 调制传输速率较低, 并且在多径信道和频带干扰情况下性能较差。为解决上述问题, 提出一种用于提升信道容量的新型 MSFCSK-Chirp 调制方式。该方式利用 Chirp 信号的多斜率、多频带与多循环移位特性, 实现各 MSFCSK-Chirp 信号之间的正交。进一步推导了 MSSK-Chirp、MFSK-Chirp、MCSK-Chirp 的正交条件, 以证明 MSFCSK-Chirp 的可行性。通过分析 MSFCSK-Chirp 信号的频谱效率, 证明 MSFCSK-Chirp 信号能有效提升信道容量。在扩频因子为 6~12 的情况下, 与 MCSK-Chirp、MFSK-Chirp 和 MFCSK-Chirp 方式相比, MSFCSK-Chirp 方式的数据传输速率提升了 16.7%~33.3%, 并且相较于 PSK-Chirp 具有更低的峰均比。仿真结果表明, MSFCSK-Chirp 信号相较于 MCSK-Chirp 信号具有更好的抗多径性能, 相较于 MFSK-Chirp 信号具有更好的抗干扰性能。因此, 文章所提 MSFCSK-Chirp 方式在高数据传输速率物联网场景及复杂信道条件下, 展现出较好的应用前景。

**关键词:** Chirp 调制; 多径信道; 频带干扰; 频谱效率

中图分类号: TN92

文献标志码: A

DOI: 10.11959/j.issn.1000-436x.2026052

## New MSFCSK-Chirp modulation scheme to improve transmission efficiency

Xiu Menglei, Dou Gaoqi, Liu Chunkai

School of Electronic Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China

**Abstract:** Chirp modulation, due to its unique linear frequency modulation method, has become a key technology adopted by the physical layer of low-power wide-area network (LPWAN). Chirp modulation has a low transmission rate and poor performance in multi-path channels and band interference. To address these issues, a new MSFCSK-Chirp modulation scheme was proposed to improve transmission efficiency. This scheme utilized the multi-slope, multi-band and multi-cyclic shift of Chirp signals to achieve orthogonality among various MSFCSK-Chirp signals. The orthogonality conditions for MSSK-Chirp, MFSK-Chirp and MCSK-Chirp were derived to demonstrate the feasibility of MSFCSK-Chirp. The spectral efficiency of MSFCSK-Chirp was analyzed, proving that it can effectively enhance channel capacity. With spreading factors ranging from 6 to 12, the data transmission rate increases by 16.7% to 33.3% compared to MCSK-Chirp, MFSK-Chirp, and MFCSK-Chirp, while maintaining a lower peak-to-average power ratio (PAPR) than PSK-Chirp. Simulation results further indicate that MSFCSK-Chirp signals exhibit superior multipath resistance compared to MCSK-Chirp signals and better interference resistance than MFSK-Chirp signals. The proposed MSFCSK-Chirp scheme represents a promising alternative for high-transmission data IoT applications in complex channels.

**Keywords:** Chirp modulation, multipath channel, band interference, spectral efficiency

收稿日期: 2025-11-03; 修回日期: 2026-02-06

通信作者: 窦高奇, 0909011022@nue.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No.61871473); 海军工程大学自主研发计划基金资助项目(No.2023503090)

**Foundation Items:** The National Natural Science Foundation of China (No.61871473), Naval Engineering University's Independent Research and Development Program Project (No.2023503090)

## 0 引言

近年来,物联网(Internet of things, IoT)正推动全球信息产业的新一轮技术变革,其技术应用水平直接影响各国在信息技术领域的竞争优势<sup>[1-3]</sup>。自2020年以来,物联网需求逐渐向低速率、低功耗的无线场景倾斜,低功耗广域网(low power wide area network, LPWAN)技术应运而生<sup>[4-5]</sup>。随着物联网研究的持续深入,以LoRa、NB-IoT等<sup>[6-8]</sup>为代表的LPWAN技术已成为物联网领域的研究热点<sup>[9-11]</sup>。为推动LoRa的应用,LoRa联盟作为一个开放的非营利组织推出了LoRaWAN网络,该网络是当前市场上唯一达成生态共识的网络标准,本文重点关注其物理层设计。

LoRaWAN物理层的关键技术是LoRa调制,这是一种基于Chirp的扩频调制技术<sup>[12-13]</sup>。LoRa调制的两个关键参数为扩频因子SF和带宽 $B$ 。增大SF可以显著提升系统的抗噪性能,但代价是增加通信时间、降低通信速率;增大 $B$ 可以在有限时间内提升通信速率,但需要考虑带宽资源的利用效率。因此,SF和 $B$ 之间存在固有矛盾,其本质是带宽资源与通信周期之间的权衡。尽管物理层相关技术已被Semtech公司申请专利,但其传输机制尚未公开。经过不断的研究探索,LoRa物理层虽然能支持长距离、低功耗的可靠通信,并且可以通过调制SF提升数据传输速率,但其最大传输速率仍然偏低,频谱效率受限。为了克服这一缺点,有必要对传统Chirp信号进行改进以提升传输速率。2018年,Chirp-BOK扩频调制方式被应用于水声通信研究中<sup>[14]</sup>,实验结果表明,该系统具有良好的抗噪声和抗多径性能,但其采用二进制正交键控调制方式,信息传输速率较低。文献[15]提出一种通过 $M$ 进制过调制方式来额外携带信息比特,从而提升信息的传输速率,为后续进一步提升信息容量提供了参考。

近年来,一系列提升LoRa吞吐量的方法被相继提出,包括交织Chirp扩频LoRa(interleaved chirp spreading LoRa, ICS-LoRa)、斜率移位键控LoRa(slope-shift keying LoRa, SSK-LoRa)、相位移位键控LoRa(phase-shift keying LoRa, PSK-LoRa)和索引调制LoRa(index modulation LoRa, IM-LoRa)。ICS-LoRa通过对LoRa码片进行分组交织,实现LoRa基带信号之间的准正交。文献[16]

通过将ICS-LoRa部署为与标称LoRa网络共存的并行逻辑网络来增大LoRa网络容量,研究结果表明,将ICS-LoRa作为并行网络引入可以提供42%的容量增益。文献[17]在每个传输的ICS-LoRa符号中添加一个额外的比特,在SF=7时实现14%的容量提升,而灵敏度损失仅为0.8 dB。PSK-LoRa则利用不同初始相位的LoRa信号之间相互独立,文献[18]提出一种增强型PSK-LoRa,其通过对LoRa信号的相位进行调制,改变了匹配滤波后实数值与负数值之间的相位关系,从而增加LoRa携带的信息容量。然而,ICS-LoRa与PSK-LoRa均存在相位连续性破坏的问题,这种信号之间的中断导致发送信号的带外辐射功率较大,造成频带扩展和信号传输失真较大。索引调制是一种利用传输实体索引来携带信息的调制方式,这些传输实体索引既可以是实际存在的(如天线、载波等),也可以是虚拟的(如时隙、编码、调制方式等)。文献[19]通过对索引序列进行分组,同时发送多个不同循环移位的LoRa信号,这些信号之间是正交的,同时增加了LoRa的吞吐量。文献[19]中提出的方案II是在方案I基础上进行改进的,利用选取分组方式来进一步增大吞吐量,虽然能较快地提高信息速率,但两个正交的LoRa信号同时发送会导致3 dB的能量损失,并破坏信号的恒包络特性,使传输信号峰均比增大,难以在功率放大器的线性放大区域正常工作。文献[20-28]均指出了数据速率的提升导致误码率下降的问题,而下降幅度必须是可接受的。Raza等<sup>[29]</sup>指出,有必要进一步优化LoRa调制,以满足不同应用场景对数据速率的要求。SSK-LoRa是一种经典的增大LoRa容量的方式,由于上调频Chirp与下调频Chirp具有良好的互相关性,可在不扩展频率的基础上通过索引实现信息传输<sup>[30]</sup>。值得一提的是,SSK-LoRa难以采用多进制SSK对LoRa进行调制,主要原因是多进制SSK的引入会对信号之间的正交性造成较大影响,导致抗噪性能显著下降。文献[25]提出将上下Chirp信号并行传输可有效增大信息吞吐量,但这种不具有恒包络特性的信号仍是一种性能较差的传输波形。而MFCFSK-Chirp信号<sup>[26]</sup>是一种优化抗多径性能与抗噪声性能的有效方法,降低了MFSK-Chirp和MCSK-Chirp在水声信道下的误码率。尽管MFCFSK-Chirp无法增大信号吞吐

量, 但它为引入多进制 SSK 调制以增加信息比特提供了可能。同时, MFCSK-Chirp 具有恒包络特性, 且相较于 PSK-LoRa 具有更好的相位连续性。

对于 Chirp 调制而言, 需满足以下设计要求:

1) 具有稳定的恒包络与相位连续性, 相位中断和并行传输均会造成峰均比较大; 2) 具备优异的抗干扰性能, 所提方式应能有效改善多径衰落、频带干扰等带来的不利影响; 3) 具有较高的频谱效率, 即在单个符号传输时携带较高的信息量。基于以上动机, 本文的主要贡献归纳如下。

1) 结合 MSSK、MFSK、MCSK 调制方式, 提出一种多斜率、多频带、多循环移位量的 Chirp 调制方式 MSFCSK-Chirp。

2) 分别研究 MSSK、MFSK、MCSK 信号之间的正交性, 验证 MSFCSK-Chirp 调制方式的可行性。

3) 研究不同 Chirp 调制方式的频谱效率和峰均比特性, 证明 MSFCSK-Chirp 具有较高的频谱效率及较低的峰均比, 并对复杂度进行分析。

4) 分析 MSFCSK-Chirp 在多径信道和频带干扰下的误码性能。仿真结果表明, 相较于 MCSK-Chirp, MSFCSK-Chirp 具有更好的抗多径性能; 相较于 MFSK-Chirp, MSFCSK-Chirp 具有更好的抗频带干扰性能, 同时 MSSK 调制的引入可额外提升信道容量。

## 1 MSFCSK-Chirp 系统正交性分析

MSFCSK-Chirp 方式主要由基于 Chirp 信号的 MCSK 调制、MFSK 调制、MSSK 调制 3 种方式构成, 其中, MCSK 和 MFSK 主要用于携带信息, 而 MSSK 则携带少量额外信息以提升频谱效率。确保 MSFCSK-Chirp 信号可靠性的重要前提在于信号之间的正交性或准正交性, 本节主要介绍这 3 种调制方式, 并分析其正交性。

### 1.1 MCSK-Chirp 调制

MCSK-Chirp 是一种典型的线性调频调制技术, 也是 LoRaWAN 物理层的主要调制方式, 即 LoRa 调制。MCSK-Chirp 调制通过对 Chirp 信号的频率循环移位来改变初始频率, 每个初始频率携带不同的信息进行数据传输。令 MCSK-Chirp 信号的扩频因子为 SF, 传输的信息为  $k \in [0, 1, \dots, 2^{\text{SF}} - 1]$ , 符号带宽为  $B_s$ , 符号持续时间为  $T_s$ , 调频参数为

$\mu = \frac{B_s}{T_s}$ 。将 MCSK-Chirp 符号的带宽与持续时间等

分为  $M_c = 2^{\text{SF}}$  个码片, 码片带宽  $B_c = \frac{B_s}{2^{\text{SF}}}$ , 码片持

续时间  $T_c = \frac{T_s}{2^{\text{SF}}}$ ,  $k$  值同样映射为 Chirp 信号的循环移位码片数, 不同循环移位量的 MCSK-Chirp 信号可表示为

$$s(t) = \exp\left\{j\pi\mu\left[\left(\frac{k}{M_c}T_s + t\right) \bmod (T_s)\right]^2\right\} \quad (1)$$

其中,  $t \in [0, T_s]$ 。两个分别携带信息  $k$  和  $k'$  的 MCSK-Chirp 信号的相关性可表示为

$$\begin{aligned} \rho(k, k') &= \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} s(t, k) \cdot s^*(t, k') dt = \\ &= \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} \exp\left\{j\pi\mu\left[\left(\frac{k}{M_c}T_s + t\right) \bmod (T_s)\right]^2\right\} \cdot \\ &= \exp\left\{-j\pi\mu\left[\left(\frac{k'}{M_c}T_s + t\right) \bmod (T_s)\right]^2\right\} dt = \\ &= \exp(-j\pi\mu\tau(\tau - T_s)) \cdot \text{sinc}(\mu\tau T_s) \end{aligned} \quad (2)$$

其中,  $\text{sinc}(x) = \frac{\sin(\pi x)}{\pi x}$ , 当  $x$  为非零整数时,

$\text{sinc}(x) = 0$ 。令  $\tau = \frac{k - k'}{M_c} T_s$  为携带不同信息时 MCSK-

Chirp 信号的时延,  $\mu\tau T_s = \frac{B_s}{T_s} \cdot \frac{k - k'}{M_c} T_s \cdot T_s = \frac{k - k'}{M_c}$

$B_s T_s$ 。因此, MCSK-Chirp 信号归一化的相关值可表示为

$$|\rho| = \left| \text{sinc}\left(\frac{k - k'}{M_c} B_s T_s\right) \right| \quad (3)$$

为使 MCSK-Chirp 信号的多个状态之间正交, 需要使  $|\rho|$  尽量小。因此, 当  $B_s T_s = a M_c (a = 1, 2, 3, \dots)$  时,  $|\rho_0| = 0$ , 信号可携带  $\log_2 M_c$  bit 信息。图 1(a) 展示了 MCSK-Chirp 时频曲线, 图 1(b) 展示了 MCSK-Chirp 信号匹配滤波 (循环相关) 后的输出结果。实验结果表明, 不同循环移位的 MCSK-Chirp 信号之间是严格正交的, 仅当两信号的循环移位量 ( $k = k'$ ) 相同时, 才会出现单一峰值。由图 1 可以看出, MCSK-Chirp 信号的特点是  $M_c$  个信号之间占用的带宽均为  $B_s$ , 均占用了整个带宽, 可以有效克服一定程度的窄带干扰。

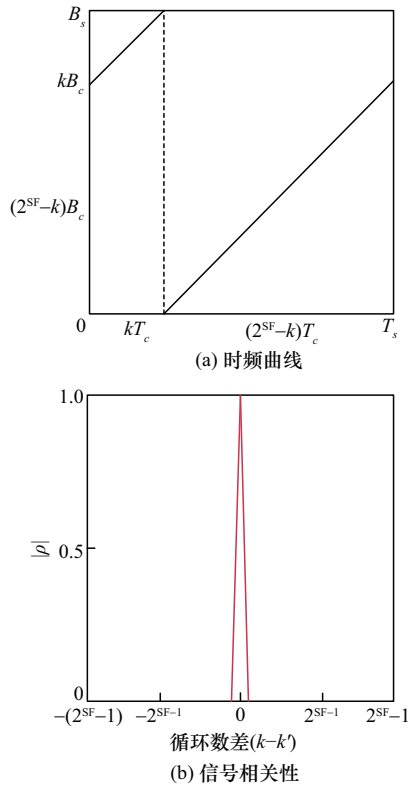


图 1 MCSK-Chirp 调制

### 1.2 MFSK-Chirp 调制

MFSK-Chirp 调制通过对 Chirp 信号的频带进行分组, 将 Chirp 信号划分为  $M_f$  个子载波, 这些子载波的持续时间为  $T_s$ , 子带带宽为  $B_c = \frac{B_s}{M_f}$ 。这些子载波的起始频率  $f_n$  各不相同, 调频率均为  $\mu = \frac{B_s}{T_s}$ 。在 MFSK-Chirp 信号时频图中, 每个子载波可表示为

$$s_n(t) = \exp(j\pi(2f_n t + \mu t^2)) \quad (4)$$

其中,  $t \in [0, T_s]$ ,  $f_n$  表示第  $n$  个子载波的初始频率, 即

$$f_n = (n - 1)B_c \quad (5)$$

其中,  $n \in [1, 2, \dots, M_f]$ , 选取任意子载波的 Chirp 信号进行发送, 任意两个子载波  $n$  和  $n'$  的 MFSK-Chirp 信号的相关性可表示为

$$\begin{aligned} \rho(n, n') &= \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} s_n(t) \cdot s_{n'}^*(t) dt = \\ &= \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} \exp(j\pi(2f_n t + \mu t^2)) \cdot \exp(-j\pi(2f_{n'} t + \mu t^2)) dt = \\ &= \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} \exp(j2\pi(n - n')B_c t) dt = \end{aligned}$$

$$\frac{1}{j2\pi(n - n')B_c T_s} \exp\left(j2\pi(n - n') \frac{B_s T_s}{M_f} - 1\right) \quad (6)$$

当  $B_s T_s = aM_f$  ( $a = 1, 2, 3, \dots$ ) 时,  $|\rho| = 0$ , 可携带  $\log_2 M_f$  bit 信息。实验结果表明, 当  $B_s T_s$  为  $M_f$  的整数倍时, 各个子载波的信号是严格正交的。图 2(a) 展示了 MFSK-Chirp 时频曲线, 图 2(b) 展示了 MFSK-Chirp 信号相关性。

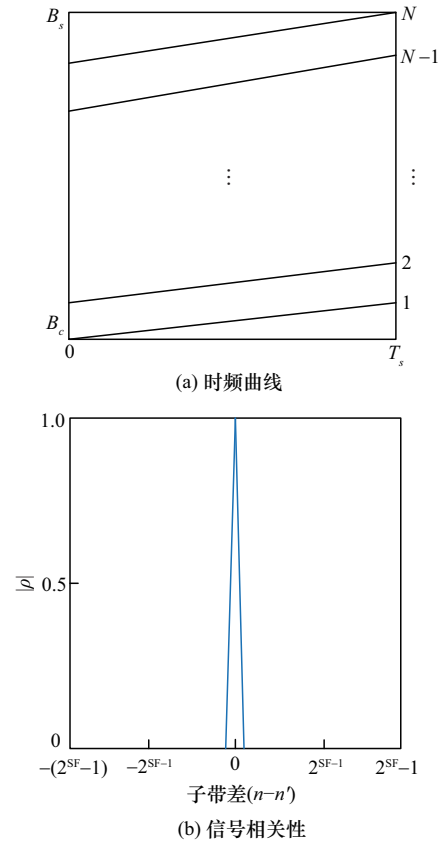


图 2 MFSK-Chirp 调制

由图 2 可以看出, MFSK 信号的特点是将整个信号带宽分为  $M_f$  个带宽为  $B_c$  的子带, 因此发送的单个信号带宽为  $B_c$ , 从而有效抵抗频率选择性衰落。

### 1.3 MSSK-Chirp 调制

MSSK-Chirp 是一种通过调制信号斜率来保证信号正交的调制方式, 其基本原理是对 Chirp 信号的斜率进行索引, 从而携带信息。不同斜率的信号之间存在一定的正交性, 这种正交性是保证 MSSK-Chirp 信号引入 MFCSK 信号的关键。在 MSSK 调制时频图中, 任意 Chirp 信号可表示为

$$s(t) = \exp(j\pi(2f_i t + \mu_i t^2)) \quad (7)$$

其中,  $t \in [0, T_s]$ ,  $f_i \in [0, B_s]$ ,  $\mu_i \in \left[-\frac{B_s}{T_s}, \frac{B_s}{T_s}\right]$ 。对于两个初始频率为  $f_i$  和  $f_{i'}$ 、斜率为  $\mu_i$  和  $\mu_{i'}$  的 Chirp 信号来说, 其相关性可表示为

$$\begin{aligned} \rho(f_i, f_{i'}, \mu_i, \mu_{i'}) &= \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} s_i(t) \cdot s_{i'}^*(t) dt = \\ &= \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} \exp(j\pi(2f_i t + \mu_i t^2)) \cdot \exp(-j\pi(2f_{i'} t + \mu_{i'} t^2)) dt = \\ &= \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} \exp(j\pi(2(f_i - f_{i'})t + (\mu_i - \mu_{i'})t^2)) dt \quad (8) \end{aligned}$$

MSSK-Chirp 信号的相关性由两个参数决定, 初始频率差  $\Delta f = f_i - f_{i'}$ , 斜率差  $\Delta \mu = \mu_i - \mu_{i'}$ 。通过对  $M_s$  个不同斜率的 Chirp 信号进行索引, 可携带  $\log_2 M_s$  bit 信息。当确定码元长度  $T_s$  后, 通常采用以下两种多进制斜率调制方式携带信息。

当  $\Delta f = f_i - f_{i'} = 0$ 、 $\mu_i \mu_{i'} > 0$  时, 由于斜率保持同向, 在线性调频过程中, 存在一定的频率交集, 因此, 同向斜率的 Chirp 信号之间存在一定的相关值。图 3 展示了  $\Delta f = 0$ 、 $\mu_i \mu_{i'} > 0$  时 MSSK-Chirp 的时频曲线和信号相关性。

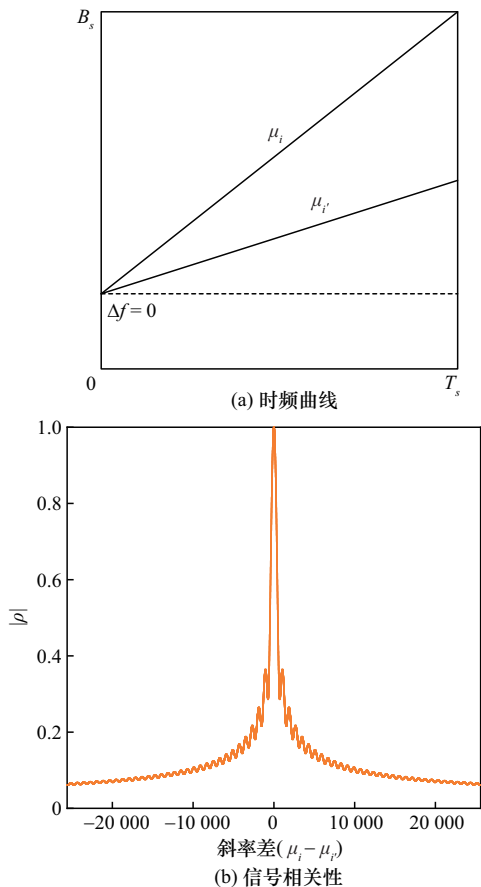


图 3  $\Delta f = 0$ 、 $\mu_i \mu_{i'} > 0$  时 MSSK-Chirp 调制

$\Delta f = f_i - f_{i'} = \mu_{i'} T_s$ 、 $\mu_i = -\mu_{i'}$  是一种常见的利用上下调频信号的正交性进行发送的典型例子, 两个信号之间斜率异向、调频方向不同, 而两个 Chirp 信号占用的带宽、时宽资源相同, 因此, 主要决定正交性的关键因素是  $B_s T_s$  值。图 4 展示了  $\Delta f = f_i - f_{i'} = \mu_{i'} T_s$ 、 $\mu_i = -\mu_{i'}$  时 MSSK-Chirp 的时频曲线和信号相关性。

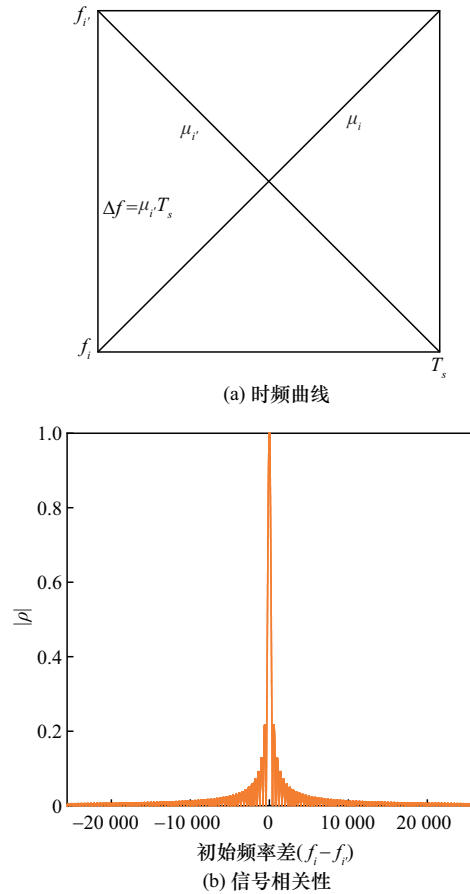


图 4  $\Delta f = f_i - f_{i'} = \mu_{i'} T_s$ 、 $\mu_i = -\mu_{i'}$  时 MSSK-Chirp 调制

相较于 MFSK 和 MCSK, MSSK 虽然不是非完全正交的, 但仍具有较好的脉冲特性。对于斜率为同符号的两个 MSSK 信号, 斜率差  $\Delta \mu$  越大, MSSK 信号的正交性越好。对于斜率互为相反数的两个 MSSK 信号, 斜率  $\mu_i$  的绝对值越大,  $\Delta \mu = \mu_i - \mu_{i'} = 2\mu_i$  的绝对值越大, MSSK 信号越接近正交。因此, 在利用 MSSK 加载信息时, 适当增大信号间的斜率差, 可有效提升信号之间的正交性。

## 2 MSFCSK-Chirp 系统

### 2.1 发射端

MSFCSK-Chirp 调制主要通过斜率、频带、循

环移位量三部分携带信息。假设待传输的信息比特为  $\mathbf{x}$ , SSK携带的信息比特为  $\mathbf{x}_s$ , FSK携带的信息比特为  $\mathbf{x}_f$ , CSK携带的信息比特为  $\mathbf{x}_c$ , 则  $\mathbf{x} = [\mathbf{x}_s, \mathbf{x}_f, \mathbf{x}_c]$ , 对应的调制阶数分别为  $M_s, M_f$  和  $M_c$ , 携带的信息  $\mathbf{x}$  的比特长度可以表示为  $\text{lb}M_s + \text{lb}M_f + \text{lb}M_c$  bit。发射端将待发送的比特信息串并转换为  $\mathbf{x}_s, \mathbf{x}_f$  和  $\mathbf{x}_c$  三部分消息。 $\mathbf{x}_s$  的消息用于索引  $M_s$  个斜率, 携带  $\text{lb}M_s$  bit 信息;  $\mathbf{x}_f$  用于索引  $M_f$  个频率子带, 携带  $\text{lb}M_f$  bit 信息;  $\mathbf{x}_c$  决定循环移位量, 携带  $\text{lb}M_c$  bit 信息。相较于 MFSK 和 MCSK, MFCSK 不额外携带信息, 因此,  $M_f M_c = 2^{\text{SF}}$ 。根据所选择的斜率  $\mu$ 、频带  $f$  和  $k$  循环移位量, 生成 MSFCSK-Chirp 信号后送入信道, MSFCSK-Chirp 发射端流程如图 5 所示。

发射信号可表示为

$$s(t) = \exp\left(j2\pi f_n \left(\frac{k}{M_c} T_s + t\right) \bmod (T_s) + j\pi \mu_i \left[\left(\frac{k}{M_c} T_s + t\right) \bmod (T_s)\right]^2\right) \quad (9)$$

其中,  $t \in [0, T_s]$ ,  $i \in \{1, \dots, M_s\}$ ,  $n \in \{1, \dots, M_f\}$ ,  $k \in \{1, \dots, M_c\}$ 。通过改变  $i, n$  和  $k$  的索引值, 分别选择 MSFCSK-Chirp 信号的斜率、频带和循环移位量。为详细介绍 2S2F2CSK-Chirp 调制过程, 以传统 LoRa 为基础, 扩频因子  $\text{SF}=4$ ,  $B_s T_s=16$ ,  $M_s=4$ ,  $M_f M_c=16$ , 共携带 6 bit 信息, 具体如图 6 所示。

通过对 6 bit 信息进行串并转换, 选取其中 2 bit 索引传输信号的斜率, 其余 4 bit 则用于实现 4F4CSK、16CSK 调制。由此可见, MSSK 是在 MCSK、MFSK 或 MFCSK 基础上额外携带信息的关

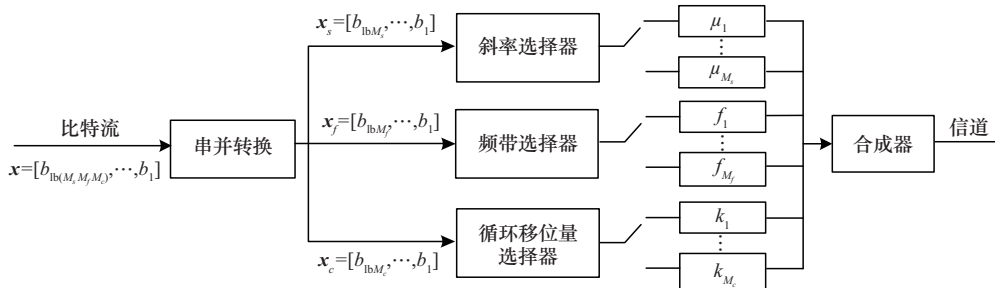


图5 MSFCSK-Chirp发射端流程

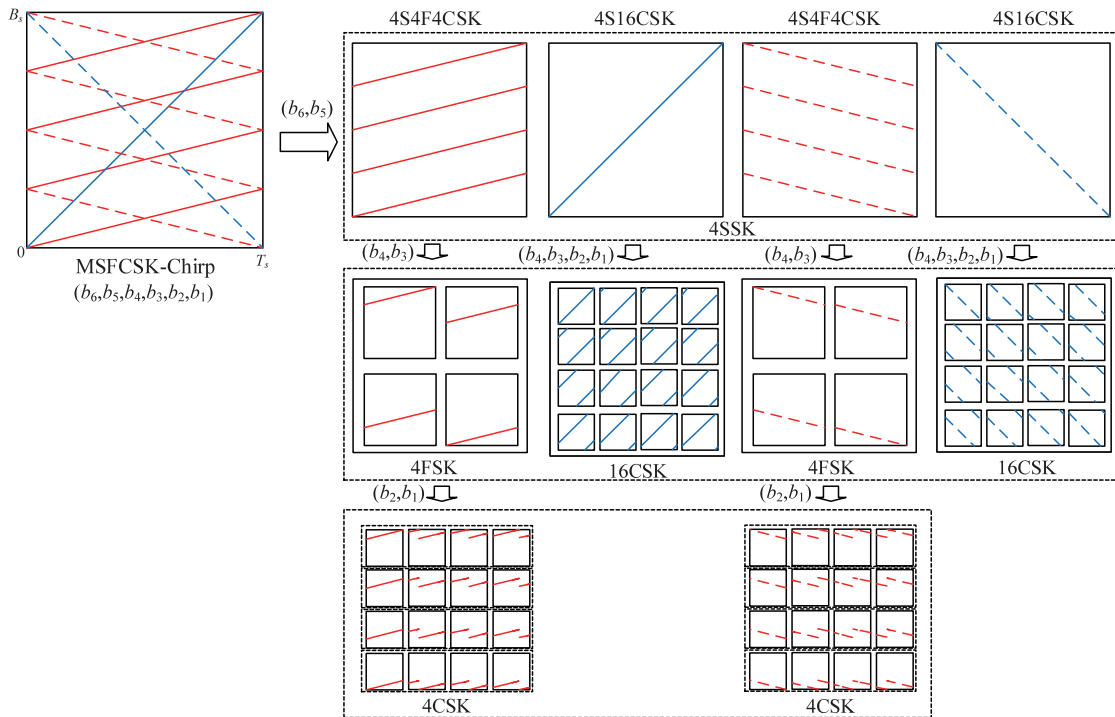


图6 2S2F2CSK-Chirp调制过程

键。实际上，SSK斜率的选择并非只有4种取值，但由于带宽和时宽资源受限，若 $M_s$ 取值较大，不仅会增加通信系统的复杂度，还会降低抗噪性能。因此，选取斜率的主要原则是在保证信号之间的正交性的前提下，根据不同的信道特性进行合理权衡。

### 2.2 接收端

MSFCSK-Chirp接收端流程如图7所示，接收端在收到信号后，首先经过 $M_s$ 个斜率匹配滤波器，然后每个斜率匹配滤波器的输出需要再经过 $M_f$ 个频率循环相关器。这些相关器主要将总频带 $B_s$ 划分为 $M_f$ 个子频带，并在每个子频带内进行循环移位相关运算，从而得到 $M_c$ 个相关值。通过相关值最大位置可解调出循环移位信息 $\hat{x}_c = [\hat{b}_{lb_{M_c}}, \dots, \hat{b}_1]$ ，通过最大相关值对应的频率循环移位器索引可解调出 $\hat{x}_f = [\hat{b}_{lb_{M_f}}, \dots, \hat{b}_1]$ ，而对应的斜率匹配滤波器可解调出 $\hat{x}_s = [\hat{b}_{lb_{M_s}}, \dots, \hat{b}_1]$ 。最终，将解调出的信息结果并串转换为 $\hat{x} = [\hat{x}_s, \hat{x}_f, \hat{x}_c]$ 。

## 3 性能分析

MSFCSK-Chirp信号旨在解决频谱效率、多径衰落和频带干扰3个问题。其中，引入MSSK的目的是在相同带宽和持续时间前提下额外携带信息比特，引入MFSK的目的是抗多径衰落，引入MCSK的目的是降低干扰信号的影响。下文主要分析各调制方式在改善性能方面所依据的基本原理。

### 3.1 频谱效率和峰均比

决定发射信号优劣的关键因素主要包括频谱效率和峰均比。频谱效率指在给定带宽和时宽下，信号所能携带的信息量。频谱效率的提升通常以增加

复杂度和误码率为代价，对于Chirp信号而言，相较于MFSK和MCSK，MFCSK-Chirp携带信息量为 $lbM_f + lbM_c = B_s T_s$ ，并未额外携带信息。在保证正交性的前提下，MSSK可有效用于携带额外信息。峰均比指信号的最大瞬时功率与平均功率的比值，其大小直接影响功率放大器的效率和系统的整体性能。频谱效率可表示为

$$\eta_b = \frac{R_b}{B_s} = \frac{lb(M)}{B_s T_s} \quad (10)$$

其中， $R_b$ 为信息传输速率，表示 $M$ 进制码元在单位时间内携带的平均信息量，单位为bit/s， $M$ 表示码元的进制数。对于时宽 $T_s$ 确定的Chirp信号而言，提升通信系统频谱效率的途径主要包括提高码元进制数或减小信号的带宽扩展。MSFCSK-Chirp通过有效减小带宽扩展，同时提高码元传输速率，从而提高频谱利用率。峰均比可表示为

$$PAPR = 10 \lg \left( \frac{P_{\text{peak}}}{P_{\text{rms}}} \right) \quad (11)$$

高峰均比要求功放器件在发射信号时具备更大的线性范围，以避免信号非线性失真。当固定信号后，平均功率往往是固定值，多信号的叠加是造成高峰值功率的重要因素。假设发射信号是由 $N$ 个正交信号相互叠加发射的，根据式(9)，发射信号可表示为

$$s(t) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{j=1}^N s_j(t) \quad (12)$$

其中， $s_j(t)$ 表示叠加的式(9)中的信号。多信号叠加可以有效携带更多信息，当单个信号携带 $lbM$  bit信息时，式(12)中的信号可携带 $MlbM$  bit信息。然而，其代价是当总功率一定时，每个信号的功率权重减小，导致抗噪性能下降。同时，峰均比不稳

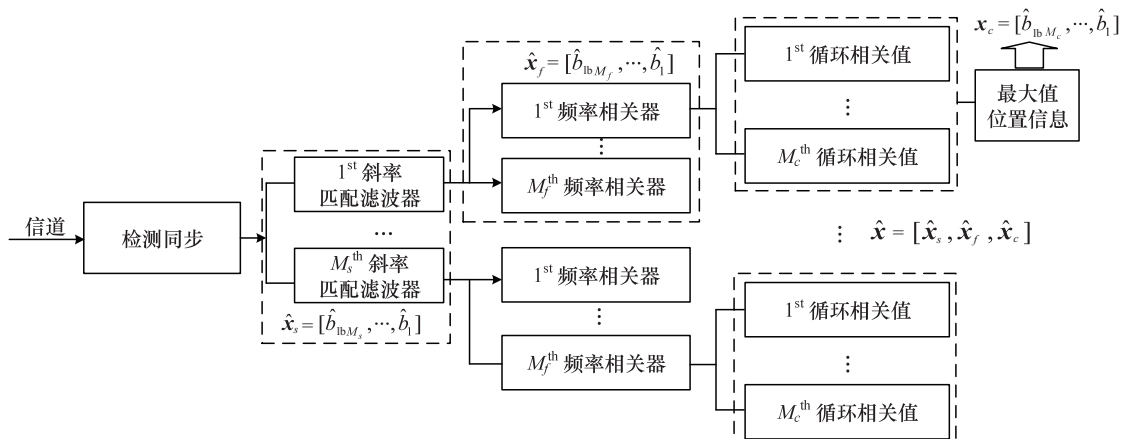


图7 MSFCSK-Chirp接收端流程

定,多信号叠加会出现瞬时峰值,使峰均比增大,从而削弱了发射端功率放大器的功率。因此,MSFCSK-Chirp调制避免了多个信号叠加引起的PAPR增加问题,单个MSFCSK啁啾信号确保短分组系统的恒定包络。

根据式(11)的分析,假设SSK恒定携带2 bit信息,图8对比了在SF为6~12(对应的 $B_s T_s$ 为64~1 024)条件下,MSFCSK-Chirp与MFCFSK-Chirp、MCSK/MFSK-Chirp、ICS-LoRa、ePSK-LoRa、FBI-LoRa的频谱效率。实验结果表明,MSSK使信号在带宽范围内保持恒包络,产生的峰均比较小,这样便于工程实现时使用功率效率高的功率放大器。图8展示了多个Chirp信号的频谱效率,图9展示了多个Chirp信号的峰均比。

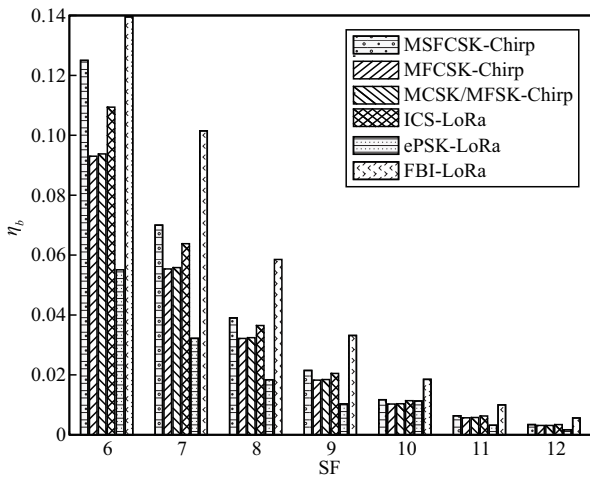


图8 多个Chirp信号的频谱效率

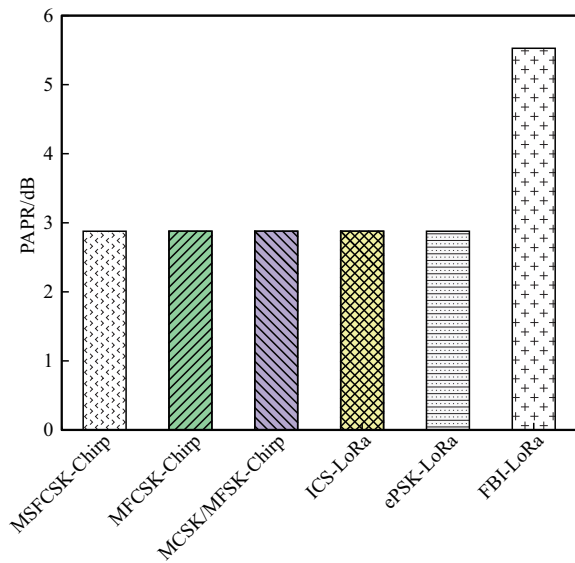


图9 多个Chirp信号的峰均比

综合图8和图9可知,在扩频因子SF为6~10的情况下,MSFCSK-Chirp的频谱效率相较于ICS-LoRa提升了约8.3%~15.0%,相较于传统LoRa/MFCSK提升了16.7%~33.3%,而其峰均比未显著提高。ePSK-LoRa因大量破坏码元连续性,导致频谱扩展,因此频谱效率较低。FBI-LoRa尽管通过叠加多个正交信号来获取额外信息,使频谱效率显著提高,但是多个信号的叠加不仅减小了单个Chirp信号的功率,还导致较大的瞬时峰值,使得峰均比显著增高,对功率放大器提出了更严格的要求。

### 3.2 抗多径性能

多径衰落是由于传播环境中存在反射体,造成电磁波从不同路径到达接收端。由于不同路径的传播距离不同,到达接收端的时间也不同,因此造成时间延迟扩展。对于两个相邻码元来说,上一个码元的拖尾会形成码间串扰。以两条路径进行分析,码元1的多径时延对码元2造成干扰。假设主径幅值为1,次径幅值为A,时延为τ,令次径幅值为A,接收码元可表示为

$$r(t) = \begin{cases} As_1(t + T_s - \tau) + s_2(t), & t \in [0, \tau] \\ s_2(t) + As_2(t - \tau), & t \in [\tau, T_s] \end{cases} \quad (13)$$

相关值可表示为

$$\rho = \frac{1}{T_s} \left( \int_0^\tau s_2(t) \cdot As_1^*(t + T_s - \tau) + \int_\tau^{T_s} s_2(t) \cdot (As_2^*(t - \tau) + s_2^*(t)) dt \right) \quad (14)$$

多径条件下MFSK和MCSK相邻两个符号的时频曲线如图10所示。

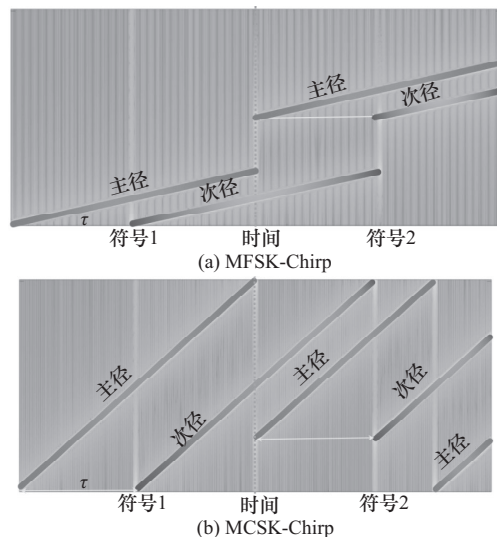


图10 多径条件下MFSK和MCSK相邻两个符号的时频曲线

由图 10 可以看出, 当前后两个码元处在不同频带时, Chirp 信号相关值较小, 因此式(14)的第一项相关值影响较小。这说明多径效应具有一定的频率选择性, 而 MFSK-Chirp 由于处在不同频带内, 可有效缓解信道频率选择性衰落的干扰。

对于 MCSK-Chirp 信号来说, 利用的就是连续 Chirp 信号的时隙循环移位携带信息, 码元 1 的多径时延信号不仅与码元 2 的主径存在相关值, 也可能与其他循环移位量的 Chirp 信号具有很大的相关值, 这将显著增加信息解调的错误概率。

为进一步展示 MFSK 的抗多径性能, 引入多径平均相关值的概念。多径平均相关值指次径信号遍历所有信号的归一化平均相关值, 该值的大小表示次径信号对主径信号的干扰程度。归一化平均相关值越大, 表示次径信号与主径多路信号的相关性越高, 从而使主径信号的解调性能降低。图 11 为不同时延情况下, MFSK 和 MCSK 的多径干扰归一化平均相关值。

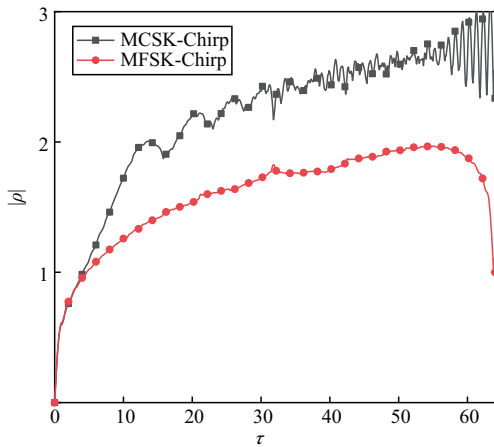


图 11 多径干扰相关曲线

图 11 表明, 多径造成干扰的相关值会影响主径正确解调的判断, 而 CSK 的多径干扰相关值远大于 FSK。这说明与 MCSK-Chirp 相比, MFSK-Chirp 具有良好的抗多径性能, 能够在多径衰落信道中有效克服频率选择性衰落对信号产生的影响。

### 3.3 抗窄带干扰性能

窄带干扰通常指第三方信号的工作频段与收发端信号的工作频段发生重叠, 从而对通信过程造成一定影响的情况。对于固定频带的干扰信号, 尽管 MFSK-Chirp 和 MCSK-Chirp 信号的信道带宽相同,

但由于 MFSK-Chirp 的单个信号带宽  $B_c$  较小, 当干扰信号的带宽与 MFSK-Chirp 信号相当时, 对 MFSK-Chirp 而言就是全带干扰, 而对 MCSK-Chirp 则更近似于窄带干扰, 因此 MFSK 更容易受干扰信号的影响。为更清晰地说明这一干扰过程, 假设干扰信号出现在信道带宽中的任意一段, 干扰信号为  $I(t)$ , 带宽为  $B_I$ 。接收信号可表示为

$$r(t) = s(t) + I(t) \quad (15)$$

其中,  $t \in [0, T_s]$ , 相关值可表示为

$$\rho = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} s(t) \cdot (s^*(t) + I^*(t)) dt = 1 + \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} s(t) \cdot I^*(t) dt \quad (16)$$

对于 MFSK 信号, 当  $s(t)$  的频带与  $I(t)$  的频带重叠时, 式(16)的第二项相关值会受  $I(t)$  的影响, 取值较大, 从而显著增强或减弱相关值的绝对值, 使系统稳定性下降; 当  $s(t)$  的频带与  $I(t)$  无交叠时, 式(16)的第二项相关值则较小。

对于 MCSK 信号, 其信号带宽远大于干扰带宽。尽管干扰信号会对频带宽度  $B_I$  产生影响, 但  $B_s - B_I$  的带宽仍可使接收信号获得较大的相关峰值, 从而完成信息解调。为更好地表述干扰信号对 MCSK 和 MFSK 信号的影响, 令干扰信号为多个随机的上下调频 Chirp 信号, 带宽与子带信号相同, 即  $B_I = \frac{B_s}{M_f}$ , 信干比 SINR=0 dB, 表示干扰能量与信号能量一致。窄带干扰条件下 MCSK 和 MFSK 相邻两个信号的时频曲线如图 12 所示。

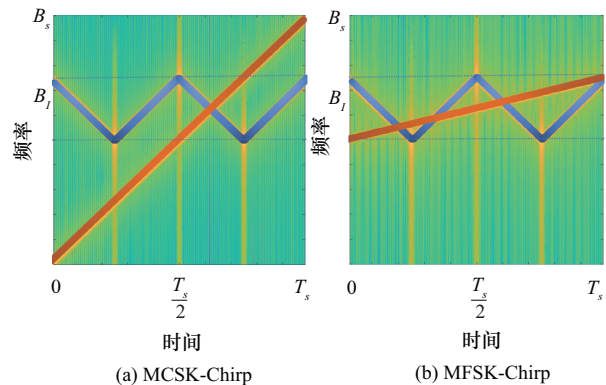


图 12 窄带干扰条件下 MCSK 和 MFSK 相邻两个符号的时频曲线

图 13 展示了受干扰 MCSK/MFSK 的归一化自相关值。

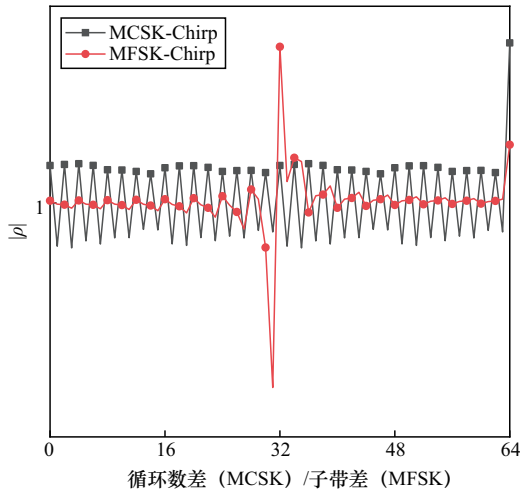


图13 受干扰MCSK/MFSK的归一化自相关值

由图13可以看出, 干扰信号对MCSK而言是窄带干扰, 对MFSK则是宽带干扰。受到干扰后, MCSK的自相关值仍在1附近波动, 说明干扰信号对MCSK解调过程中的自相关性影响较小, 而MFSK的自相关值则出现向下的脉冲。这是因为干扰信号导致对应的MFSK信号严重失真, 自相关值显著下降。

### 3.4 复杂度分析

考虑MSFCSK-Chirp调制在提升信道容量方面的潜力, 其代价是复杂度的增加, 本节主要从空间复杂度和时间复杂度两方面进行分析。

#### 1) 空间复杂度

由于携带的2 bit信息主要通过索引不同斜率的MSSK-Chirp调制信号来实现, 因此在空间上需额外增加3个相关器, 用于判定最大相关值对应的的相关器序列, 从而获得信号的斜率信息, 并解调出正确的相关信息。因此, 空间复杂度提升了4倍。

#### 2) 时间复杂度

解调MCSK-Chirp、MFSK-Chirp序列所携带的信息, 理论上需将每个相关器中的序列与接收信号相关, 分别需进行 $M_c$ 、 $M_f$ 次运算。在相同阶数相关器的情况下, 两种调制的运算速度相同, 对于MSFCSK-Chirp调制, 每次采用4个相关器, 在多个相关器同时运算的情况下, MSSK调制的引入未额外增加时间复杂度。

## 4 仿真验证

为进一步说明MSFCSK-Chirp信号的抗多径及抗频带干扰性能, 本节主要对MSFCSK在多径信

道及受干扰情况下的误码性能进行仿真, 仿真参数如表1所示。

表1 仿真参数		
参数名称	符号表示	参数值
符号带宽	$B_s$	6 400 Hz
符号时宽	$T_s$	10 ms
携带信息量	MCSK, MFSK	6 bit
	ICS-LoRa, PSK-LoRa	7 bit
	MSFCSK	8 bit
信噪比	$\frac{E_b}{N_0}$	0~10 dB
多径时延	$\tau_1, \tau_2$	0~5 ms, 5~10 ms
多径幅值	$A_1, A_2$	0.5~0.7, 0.3~0.5
干扰信号频带	$B_f$	100 Hz
干扰幅值	$A$	1

由表1可知, 在带宽为6 400 Hz、时宽为10 ms的前提下, MSFCSK-Chirp相较于传统LoRa可额外携带2 bit信息, 有效提升了数据传输速率。同时, 为有效评估MSFCSK在多径信道与受干扰情况下的误码性能, 设置次径时延 $\tau_1$ 、 $\tau_2$ 分别为0~5 ms、5~10 ms, 幅值为0.5~0.7、0.3~0.5随机分布, 干扰信号频带设置为3 200~3 300 Hz, 幅值为1。图14展示了多径衰落信道下的误码率。

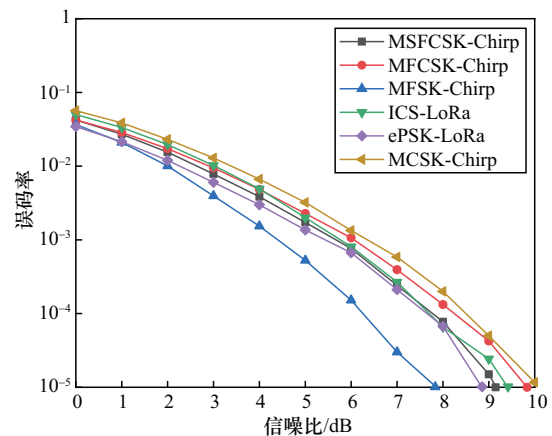


图14 多径衰落信道下的误码率

由图14可以看出, MFSK-Chirp由于其独特的选频特性, 使多径信号与其他非正确解调信号的相关值较小, 从而有效抵抗多径干扰。MCSK-Chirp信号均工作在同一频段, 其时延干扰会削弱信号之间的正交性, 造成误码率较高。MSFCSK-Chirp是

一种基于 MCSK-Chirp 和 MFSK-Chirp 的折中方式,同时引入 SSK 调制会额外携带信息。相较于 MFCSK-Chirp、ICS-LoRa 以及 ePSK-LoRa 调制,尽管 MSFCSK-Chirp 的误码性能不突出,但是图 8 和图 9 表明,其具有更高的频谱效率及更低的峰均比,这是在实际应用中评估信号优劣不可忽略的重要因素。窄带干扰信道下的误码率如图 15 所示。

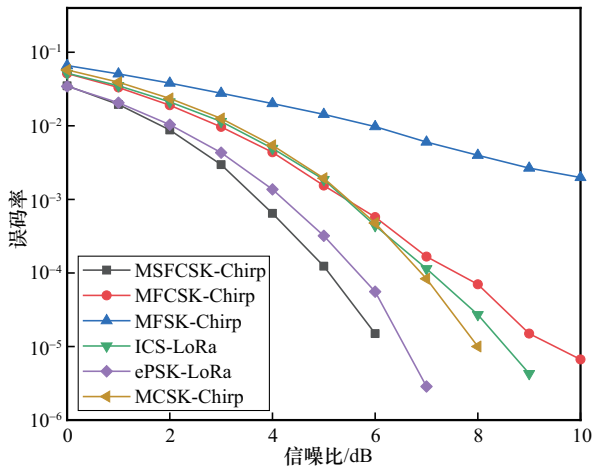


图 15 窄带干扰信道下的误码率

由图 15 可以看出,在一定频带干扰条件下, MFSK-Chirp 会受到频带内干扰信号的影响,从而削弱信号之间的正交性。MCSK-Chirp 由于单个信号带宽较宽,对一定带宽的频带干扰具有较强的抵抗能力。MSFCSK-Chirp 由于携带信息量较大,信号功率较高,窄带干扰对 MSFCSK 的影响较小,因此,MSFCSK-Chirp 信号误码率较低。同时,相较于 ICS-LoRa 和 ePSK-LoRa,MSFCSK-Chirp 不仅抗噪性能更优,还具备较高的数据传输速率。

综上所述,MSFCSK-Chirp 在多径信道及频带干扰环境下,表现出较好的误码性能。更重要的是,MSFCSK-Chirp 在保证较低峰均比的前提下,实现了更高的数据传输速率,信道容量得到显著提升。因此,本文提出的 MSFCSK-Chirp 调制方式可作为物联网在高数据速率传输及多种信道下传输的一种替代方式。

## 5 结束语

本文通过选择 Chirp 信号的斜率、频带、循环移位量携带信息来提升信道容量,所提出的容量提升主要由于 SSK-Chirp、MFSK-Chirp、MCSK-Chirp 均具有一定的正交性。与并行逻辑网络传输相比,

MSFCSK-Chirp 具有更低的峰均比,有助于降低对功率放大器的要求。同时,考虑实际应用中信道的复杂性,本文分析了 MSFCSK-Chirp 信号在多径信道及受干扰条件下的可靠性。仿真结果表明,MSFCSK-Chirp 相较于传统 LoRa,虽然略微牺牲了可靠性,但在扩频因子为 6~12 时可以额外携带 16.67%~33.33% 信息量。在多径信道下,相较于 MCSK-Chirp,MSFCSK-Chirp 的误码性能可提升约 0.8 dB。在受频带干扰情况下,MSFCSK-Chirp 信号的误码性能显著优于 MFSK-Chirp 信号。综上所述,MSFCSK-Chirp 具有高数据传输速率、低峰均比、抗多径和抗干扰等优点,因此,该方式可被视为复杂信道下高数据传输物联网实际应用中具有前景的替代方式。

## 参考文献:

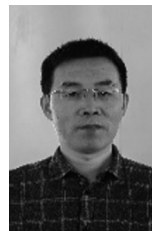
- [1] Abu Taha F, Althunibat S. Improving data confidentiality in chirp spread spectrum modulation[C]//Proceedings of the 2021 IEEE 26th International Workshop on Computer Aided Modeling and Design of Communication Links and Networks (CAMAD). Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-6.
- [2] Al Homssi B, Dakic K, Maselli S, et al. IoT network design using open-source LoRa coverage emulator[J]. IEEE Access, 2021, 9: 53636-53646.
- [3] Alabd M B, Nuss B, D Oliveira L G, et al. Modified pulse position modulation for joint radar communication based on chirp sequence[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2022, 32(10): 1247-1250.
- [4] Bankov D, Khorov E, Lyakhov A. LoRaWAN modeling and MCS allocation to satisfy heterogeneous QoS requirements[J]. Sensors, 2019, 19(19): 4204.
- [5] Bapathu H R, Borkotoky S S. The LoRa modulation over rapidly-varying channels: are the higher spreading factors necessarily more robust? [C]//Proceedings of the 2021 IEEE 18th Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC). Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-4.
- [6] Basili F, Parrino S, Peruzzi G, et al. IoT multi-hop facilities via LoRa modulation and LoRa WanProtocol within thin linear networks[C]//Proceedings of the 2021 IEEE Sensors Applications Symposium (SAS). Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-6.
- [7] Benkhelifa F, Bouazizi Y, McCann J A. How orthogonal is LoRa modulation?[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 9(20): 19928-19944.
- [8] Belo D, Correia R, Ding Y, et al. IQ impedance modulator front-end for low-power LoRa backscattering devices[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2019, 67(12): 5307-5314.
- [9] Demeslay C, Rostaing P, Gautier R. Simple and efficient LoRa receiver scheme for multipath channel[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 9(17): 15771-15785.
- [10] Demeslay C, Rostaing P, Gautier R. Theoretical performance of LoRa

- system in multipath and interference channels[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 9(9): 6830-6843.
- [11] Di Renzone G D, Landi E, Mugnaini M, et al. Assessment of LoRaWAN transmission systems under temperature and humidity, gas, and vibration aging effects within IIoT contexts[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71: 5500311.
- [12] El-Aasser M, Edward P, Mandour M, et al. A comprehensive hybrid bit-level and packet-level LoRa-LPWAN simulation model[J]. Internet of Things, 2021, 14: 100386.
- [13] Fan C L, Ding Q. A novel wireless visual sensor network protocol based on LoRa modulation[J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2018, 14(3): 155014771876598.
- [14] 伊锦旺, 朱逸, 王贤凌, 等. 基于 Chirp-BOK 扩频的水声通信系统[J]. 厦门理工学院学报, 2018, 26(1): 70-75.
- Yi J W, Zhu Y, Wang X L, et al. Underwater acoustic communication system based on Chirp-BOK spread spectrum[J]. Journal of Xiamen University of Technology, 2018, 26(1): 70-75.
- [15] 修梦雷, 窦高奇, 王颢. 基于循环移位码元的 M 进制过调制无前导短包通信方案[J]. 通信学报, 2024, 45(8): 75-83.
- Xiu M L, Dou G Q, Wang H. M-ary overmodulation based on cyclic shift symbols for pilot-free short packet communication scheme[J]. Journal on Communications, 2024, 45(8): 75-83.
- [16] Edward P, El-Aasser M, Ashour M, et al. Interleaved chirp spreading LoRa as a parallel network to enhance LoRa capacity[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(5): 3864-3874.
- [17] Elshabrawy T, Robert J. Interleaved chirp spreading LoRa-based modulation[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(2): 3855-3863.
- [18] Azim A W, Monsalve J L G, Chafii M. Enhanced PSK-LoRa[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2022, 11(3): 612-616.
- [19] Ma H, Fang Y, Cai G F, et al. A new frequency-bin-index LoRa system for high-data-rate transmission: design and performance analysis[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 9(14): 12515-12528.
- [20] An S X, Wang H, Sun Y W, et al. Time domain multiplexed LoRa modulation waveform design for IoT communication[J]. IEEE Communications Letters, 2022, 26(4): 838-842.
- [21] Azim A W, Bazzi A, Shubair R, et al. Dual-mode chirp spread spectrum modulation[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2022, 11(9): 1995-1999.
- [22] Baruffa G, Rugini L. Performance of LoRa-based schemes and quadrature chirp index modulation[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 9(10): 7759-7772.
- [23] Bomfin R, Chafii M, Fettweis G. A novel modulation for IoT: PSK-LoRa[C]//Proceedings of the 2019 IEEE 89th Vehicular Technology Conference (VTC2019-Spring). Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-5.
- [24] 赵彩丹, 陈璟乾, 吴志强. 基于多通道联合学习的自动调制识别网络[J]. 信息安全学报, 2023, 23(4): 20-29.
- Zhao C D, Chen J Q, Wu Z Q. Automatic modulation recognition algorithm based on multi-channel joint learning[J]. Netinfo Security, 2023, 23(4): 20-29.
- [25] Hanif M, Nguyen H H. Slope-shift keying LoRa-based modulation[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(1): 211-221.
- [26] Jia Z Y, Zheng W J, Yuan F. A two-dimensional chirp-MFCSK modulation method for underwater LoRa system[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 9(23): 24388-24397.
- [27] Mondal A, Hanif M, Nguyen H H. SSK-ICS LoRa: a LoRa-based modulation scheme with constant envelope and enhanced data rate[J]. IEEE Communications Letters, 2022, 26(5): 1185-1189.
- [28] Nguyen T T, Nguyen H H, Barton R, et al. Efficient design of chirp spread spectrum modulation for low-power wide-area networks[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(6): 9503-9515.
- [29] Raza U, Kulkarni P, Sooriyabandara M. Low power wide area networks: an overview[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017, 19(2): 855-873.
- [30] 郭俊杰, 禹健, 席小霞. 基于 Chirp 组合信号调制的多址技术[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(34): 205-209.
- Guo J J, Yu J, Xi X X. Multiple access technology based on chirp composite signal modulation[J]. Science Technology and Engineering, 2015, 15(34): 205-209.

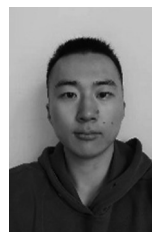
## [作者简介]



修梦雷 (1996-), 男, 安徽亳州人, 海军工程大学博士生, 主要研究方向为信息论与编码、通信与信息系统。



窦高奇 (1981-), 男, 山西长治人, 博士, 海军工程大学教授、博士生导师, 主要研究方向为无线通信理论与技术。



柳春恺 (2002-), 男, 山东烟台人, 海军工程大学博士生, 主要研究方向为信息论与编码、通信与信息系统。