

5G 通信系统同步信号抗干扰能力研究

张瑞欣, 崔高峰, 王卫东

(北京邮电大学电子工程学院, 北京 100876)

摘要: 5G 网络具有覆盖范围广, 容量大, 速率高, 延时低等优点。然而, 5G 通信系统基站位置大都固定, 易受到人为的恶意的强干扰, 干扰对通信系统的影响较大, 会降低系统性能, 影响通信质量, 因此研究通信系统的抗干扰能力具有重要意义。此外, 毫米波方向性好, 可靠性强, 传输效率高, 已广泛应用到 5G 通信业务中。在高速移动的情况下, 频段的提高会带来更大的多普勒频偏。在强干扰和高动态场景下, 时频同步算法性能需要进一步分析。因此, 本文重点研究高动态场景下 5G 通信系统同步信号的抗干扰能力。

关键词: 移动通信; 5G; 物理层; 抗干扰; 时频同步

中图分类号: TN929.5, TN973

Study on Anti interference Capability of Synchronous Signal in 5G Communication System

ZHANG Ruixin, CUI Gaofeng, WANG Weidong

(School of Electronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876)

Abstract: 5G network has the advantages of wide coverage, large capacity, high speed, low delay, etc. However, most 5G communication systems have fixed base stations, which are vulnerable to human malicious strong interference. The interference has a great impact on the communication system, which will reduce the system performance and affect the communication quality. Therefore, it is of great significance to study the anti-interference capability of the communication system. In addition, millimeter wave has good directivity, strong reliability and high transmission efficiency, and has been widely used in 5G communication services. In the case of high-speed movement, the increase of frequency band will bring greater Doppler frequency offset. In the strong interference and high dynamic scenarios, the performance of time-frequency synchronization algorithm needs further analysis. Therefore, this paper focuses on the anti-jamming capability of synchronous signals of 5G communication systems in high dynamic scenarios.

Key words: Mobile communication; 5G; Physical layer; Anti-interference; Time frequency synchronization

0 引言

从 2018 年正式发布 5G 国际标准至今, 5G 技术得到了迅速发展, 已经相对成熟。5G 在容量, 峰值速率, 频谱效率, 移动性, 连接密度等方面都有很大的提升, 实现人与物, 物与物之间的通信, 在一定程度上提高了人们的生活质量, 促进了社会的发展和进步^[1]。3GPP 制定了 5G 新空口^[2] (New Radio, NR) 技术标准, 定义了终端与基站之间的传输标

基金项目: 国家自然科学基金 (62171052); 国家自然科学基金 (61971054)

作者简介: 张瑞欣 (1995-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 卫星互联网, 5G 移动通信

通信联系人: 崔高峰 (1987-), 男, 副教授, 硕博导, 主要研究方向: 卫星互联网, 5G 等. E-mail: cui gaofeng@bupt.edu.cn

准, 相比于 LTE, 5G 的帧结构配置更加灵活, 子载波间隔, 导频等参数可配置, 可适应不同的场景。在传输波形设计上, 5G 仍沿用 LTE 技术, 采用正交频分复用 (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM), OFDM 频谱利用率高, 具有抗多径衰落, 抑制频率选择性衰落的能力, 支持多用户接入。但 OFDM 对多普勒频偏比较敏感, 多普勒频偏可以破坏子载波间的正交性, 产生码间干扰 (Inter-symbol Interference, ISI) 和载波间干扰 [3][4][5] (Inter-carrier Interference, ICI)。为解决多普勒频偏对 OFDM 系统影响问题, 5G 引入了同步信号块 (Synchronization Signal Block, SSB) 用来进行下行同步, SSB 主要包括主同步信号 (Primary Synchronization Signal, PSS)、辅同步信号 (Secondary Synchronization Signal, SSS) 和广播信道 (Physical Broadcast Channel, PBCH)。终端开机后要先进行下行同步, 获取小区标识和一些配置信息, 才可完成随机接入建立链接, 因此下行同步技术是通信的关键技术之一。

然而, 由于基站位置固定, 容易受到人为的恶意的干扰, 干扰会影响通信传输质量, 使信号中断, 降低系统的可靠性。常见的干扰一般分为压制性干扰和欺骗式干扰 [6][7][8], 压制式干扰功率远大于信号功率, 如噪声干扰, 单音干扰, 多音干扰, 扫频干扰等; 欺骗式干扰一般与信号格式相似, 可误导接收机, 使其捕获错误。相比较而言, 压制式干扰更容易产生, 威胁也更大。本文主要采用压制式干扰中的噪声干扰模型进行仿真分析。

5G 通信系统受到干扰的情况下, 下行同步信号的抗干扰能力需要进一步研究, 常用时间同步算法有 PSS 互相关算法 [9][10][11], 基于 PSS 时频二维搜索算法 [12] 等; 频偏估计算法主要分为整数倍频偏估计算法和小数倍频偏估计算法 [13][14][15][16]; 本文主要针对高动态下的 5G 通信场景, 在加入不同程度干扰后, 分析常用时频同步算法的抗干扰能力。

1 5G 物理层

1.1 5G 帧结构

本文主要采用 5G 帧结构, 5G 帧结构参数配置更加灵活, 不同的通信场景可以配置不同的帧结构。根据 3GPP 38.211 协议, 一个无线帧的帧长为 10ms, 包含 10 个子帧, 每个子帧为 1ms。NR 中根据不同的子载波间隔, 帧结构可分为以下几种不同类型, 如表 1 所示, 表 1 给出的是常规 CP 的 5G 帧结构, 不包括扩展 CP 的帧结构。

表 1 帧结构类型

Tab. 1 Frame structure type

子载波间隔	CP 类型	每个子帧时隙数	每个时隙符号数
15KHz	常规	1	14
30KHz	常规	2	14
60KHz	常规	4	14
120KHz	常规	8	14
240KHz	常规	16	14

以子载波间隔 120KHz 为例, 帧结构示意图如图 1 所示

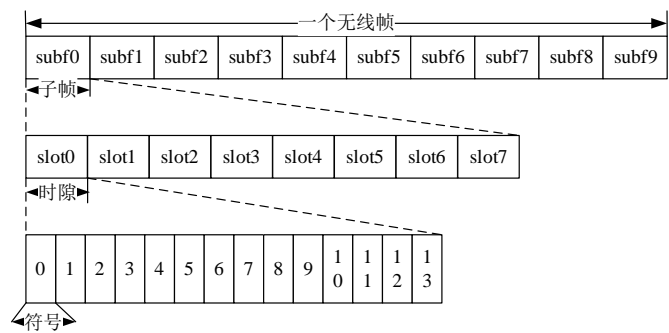


图 1 120KHz 子载波间隔帧结构示意图
Fig. 1 120KHz sub-carrier interval frame structure diagram

1.2 同步信号块 SSB

SSB 在时域上占 4 个符号，频域上占 240 个子载波，其中 PSS 序列采用长度为 127 的 m 序列，位于 SSB 的第 1 个符号上，用来获得小区组内 ID；SSS 序列采用长度为 127 的 gold 序列，位于第 3 个符号上，用来获得小区组标识；PBCH 位于第 2-4 个符号上，可以得到 MIB 信息。NR 中 SSB 时频域分布情况如图 2 所示。

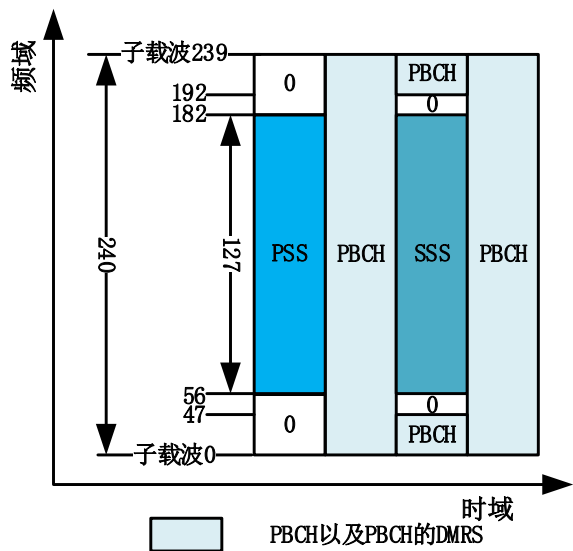


图 2 SSB 示意图
Fig. 2 Schematic diagram of SSB

PSS 序列的生成公式为

$$\begin{aligned}d_{PSS}(n) &= 1 - 2x(m) \\ m &= (n + 43N_{ID}^{(2)}) \bmod 127 \\ 0 \leq n &< 127\end{aligned}\tag{1}$$

其中 $x(m)$ 为

$$x(i+7) = (x(i+4) + x(i)) \bmod 2\tag{2}$$

初始值为

$$\begin{aligned}&[x(6)x(5)x(4)x(3)x(2)x(1)x(0)] \\ &= [1, 1, 1, 0, 1, 1, 0]\end{aligned}\tag{3}$$

2 同步信号抗干扰能力分析

2.1 信号模型

本文发送信号采用 5G 系统中 OFDM 波形。发送 bit 数据经过信道编码，加扰，调制，与 SSB 和导频映射到资源网格上，然后进行 OFDM 调制，加 CP，得到发送波形。设 $s_l(n)$ 为经过 OFDM 调制后的信号，则

$$s_l(n) = \frac{1}{\sqrt{N_{fft}}} \sum_{k=0}^{N_{fft}-1} X_{l,k} e^{j2\pi kn/N_{fft}}, 0 \leq n \leq N_{fft}-1 \quad (4)$$

式中 N_{fft} 为 IFFT 长度， l 和 k 分别表示第 l 个符号和第 k 个子载波。

考虑发送信号受到时延和多普勒频偏以及加性高斯白噪声 (Additive, White Gaussian Noise, AWGN) 和干扰的影响到达接收端。设 $s(n)$ 是发送信号， $\omega(n)$ 是加性高斯白噪声， $J(n)$ 为干扰信号， ε 为归一化多普勒频偏，到达接收端的信号模型为

$$r(n) = s(n) e^{j2\pi \varepsilon n / N_{fft}} + \omega(n) + J(n) \quad (5)$$

2.2 高速移动场景多普勒频偏分析

发射机和接收机之间的相对移动会产生多普勒频移使信道快速变化，对于 OFDM 系统，会引入 ICI 和 ISI。高速移动场景下多普勒频偏计算示意图如图 3 所示。

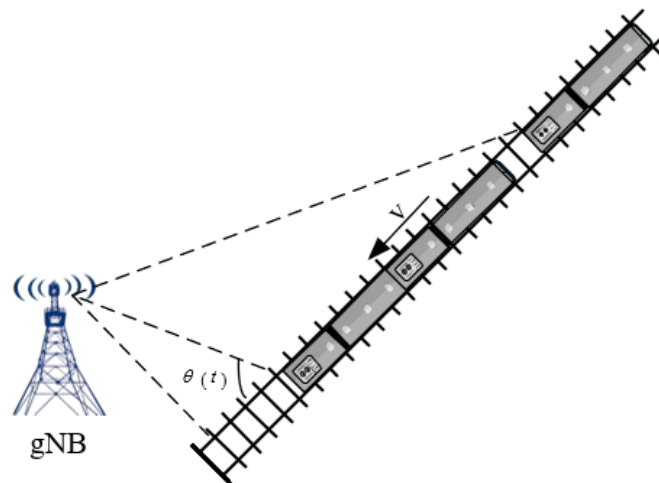


图 3 多普勒频偏计算示意图

Fig. 3 Schematic diagram of doppler frequency offset calculation

多普勒频偏的计算公式如下所示

$$f_d = f_{\max} \cos \theta(t) \quad (6)$$

式中， $f_{\max} = f_c v / C$ 为最大多普勒频偏， f_c 为载波频率， v 是发射机和接收机相对移动速度， C 是光速， $\theta(t)$ 是速度运动方向与接收机之间的夹角。由式 (6) 知多普勒频偏与发射机和接收机的相对速度，角度和载波频率有关。

4G 频段频谱资源已经十分拥挤，毫米波段逐渐应用到 5G-NR 场景，毫米波的带宽范围一般为 30GHz-300GHz，对于 500Km/h 的车速，毫米波段 5G 通信系统的多普勒频偏的范围约为 14KHz-140KHz。

2.3 时频同步算法

2.3.1 PSS 互相关时间同步算法

PSS 互相关时间同步算法是将本地 PSS 序列和接收到的数据滑动共轭相乘并求和, 取最大值, 最大值所在位置即为时间同步点, 即一个无线帧的起始位置。设本地 PSS 序列为 $x(n)$, 接收序列为 $r(n)$, 在接收序列中每次滑动取出与本地 PSS 序列相同长度, 记为 $r(n+n_0)$, n_0 为每次滑动的起始位置, $x(n)$ 与 $r(n+n_0)$ 共轭相乘求和得

$$R_{n_0} = \sum_{n=0}^{N_{ff}-1} r(n+n_0)x(n)^* \quad (7)$$

$$0 \leq n \leq N_{ff}-1$$

式 (7) 中, 只有当 $r(n+n_0) = x(n)e^{j2\pi\epsilon n/N_{ff}} + z(n)$, 即从接收数据取出的是 PSS 序列时, 利用 PSS 序列的互相关特性, 得到最大值。此时 $R = \sum_{n=0}^{N_{ff}-1} |x(n)|^2 e^{j2\pi\epsilon n/N_{ff}} + z_1(n)$, 其中, $z(n) = \omega(n) + J(n)$ 和 $z_1(n) = \sum_{n=0}^{N_{ff}-1} z(n)x(n)^*$ 分别为干扰项。可见时间同步算法的性能受噪声, 干扰和频偏的影响。

2.3.2 时频二维搜索时间同步算法

PSS 时频二维搜索算法与 PSS 互相关算法相比可以抵抗更大的频偏, 但是也具有更高的计算复杂度。时频二维搜索算法步骤如下所示。

首先本地 PSS 与接收数据滑动共轭相乘, 得

$$y_{n_0}(n) = r(n+n_0)x(n)^* \quad (8)$$

将 $y_{n_0}(n)$ 做 FFT 运算, 并求模得

$$|Y_{n_0}(k)| = \left| \sum_{n=0}^{N_{ff}-1} y_{n_0}(n) e^{-j2\pi kn/N_{ff}} \right| = \left| \sum_{n=0}^{N_{ff}-1} r(n+n_0)x(n)^* e^{-j2\pi kn/N_{ff}} \right| \quad (9)$$

同理, 当 $r(n+n_0) = x(n)e^{j2\pi\epsilon n/N_{ff}} + z(n)$ 时, $|Y_{n_0}(k)|$ 取得最大值。即

$$|Y_{n_0}(k)| = \left| \sum_{n=0}^{N_{ff}-1} |x(n)|^2 e^{\frac{j2\pi(\epsilon-k)n}{N_{ff}}} + z_2(n) \right| \quad (10)$$

其中, $z_2(n) = \sum_{n=0}^{N_{ff}-1} z(n)x^*(n)e^{-j2\pi kn/N_{ff}}$ 为干扰项, 干扰项功率越大, 对系统性能的影响越大。当 $\epsilon=k$ 时, $|Y_{n_0}| = \left| \sum_{n=0}^{N_{ff}-1} |x(n)|^2 + z_2(n) \right|$, 同步点为

$$\tau = \max |Y_{n_0}| \quad (11)$$

时间同步完成可以得到接收数据中 PSS 位置, 因此, 对式 (10), 相当于 n_0 已知, 即

125 $|Y_{n_0}(k)|$ 最大时, 可以得到整数倍频偏估计值, 为

$$\hat{\varepsilon}_I = k \quad (12)$$

对接收信号进行补偿, 得

$$r_I(n) = r(n)e^{-j2\pi n \frac{\hat{\varepsilon}_I}{N_{fft}}} \quad (13)$$

2.3.3 小数倍频偏估计算法

经过时间同步和整数倍频偏补偿之后, 系统中还存在小数倍频偏, 经典的小数倍频偏估计算法也是将接收 PSS 序列与本地 PSS 序列共轭相乘, 得

$$g(n) = r_I^{PSS}(n)x(n)^* \quad (14)$$

130 其中 $r_I^{PSS}(n) = x(n)e^{j2\pi\varepsilon_F n/N_{fft}} + z_3(n)$ 为经过整数倍频偏补偿后的 PSS 接收序列, 将式 (14) 分成两段, 前半段与后半段共轭相乘求和得

$$R_1 = e^{j\pi\varepsilon_F} \sum_{n=0}^{N_{fft}/2} |x(n)|^2 \left| x(n + \frac{N_{fft}}{2}) \right|^2 + z_4(n) \quad (15)$$

$z_4(n)$ 为干扰, 对式 (15) 求角度得到小数倍频偏估计值为

$$\hat{\varepsilon}_F = \frac{\angle(R_1)}{\pi} \quad (16)$$

式 (16) 可以得到小数倍频偏估计范围为 $\hat{\varepsilon}_F \in (-1, 1)$ 。对 $r_I(n)$ 进行小数倍频偏补偿得

$$r_{CFO}(n) = r_I(n)e^{-j2\pi n \frac{\hat{\varepsilon}_F}{N_{fft}}} \quad (17)$$

综上所述, 归一化频偏估计值为

$$\hat{\varepsilon} = \hat{\varepsilon}_I + \hat{\varepsilon}_F \quad (18)$$

135 3 仿真分析

本文首先搭建 5G 物理层通信链路仿真平台, 然后仿真分析同步信号的抗干扰能力。

3.1 仿真参数

根据前面分析, 5G 通信系统中多普勒频偏的最大值可达到 140KHz, 因此为了抵抗较大频偏的影响, 本文采用 120KHz 的子载波间隔进行仿真, 仿真参数如表 2 所示

表 2 系统仿真参数

Tab. 2 System simulation parameters

仿真参数	参数值
系统带宽	100MHz
频带利用率	92.16%
子载波间隔	120KHz
IFFT点数	1024 (常规CP)
采样频率	122.88MHz
干信比JSR	3/8dB
多普勒频偏	50KHz/140KHz
信道模型	AWGN信道

140

3.2 时间同步算法抗干扰性能分析

本文首先仿真了无频偏情况下，不同 JSR 的 PSS 互相关算法的同步性能，如图 4 所示，JSR=3dB 时，检测成功概率接近 100%；JSR=8dB 时，检测概率为 95.3%，由此可见，随着 JSR 越大，时间同步性能越差。

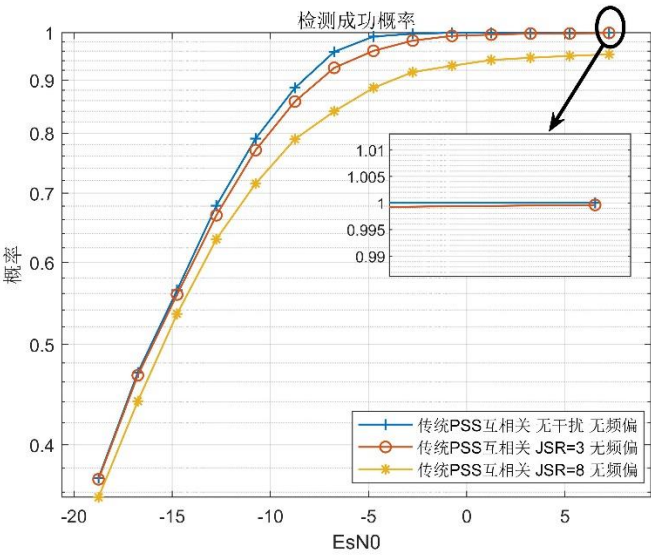


图 4 无频偏情况下 PSS 互相关算法检测性能

Fig. 4 Detection performance of PSS cross correlation algorithm without frequency offset

在图 4 的基础上，分别加入 50KHz 和 140KHz 多普勒频偏，检测成功概率分别如图 5 和图 6 所示。不加干扰时，高信噪比下 50KHz 的频偏对 PSS 互相关算法影响较小。当频偏为 50KHz 时，与不加干扰相比，JSR=3dB 检测性能损失较小；当 JSR=8dB 时，检测性能损失较大，检测成功概率为 87%，与不加干扰相比降低了 13%。可见强干扰对 PSS 互相关时间同步算法有较大的影响。当加入 140KHz 的多普勒频偏时，即频偏大于一个子载波间隔时，如图 6 所示，即使不加干扰该算法的性能也会恶化，严重影响通信系统性能。

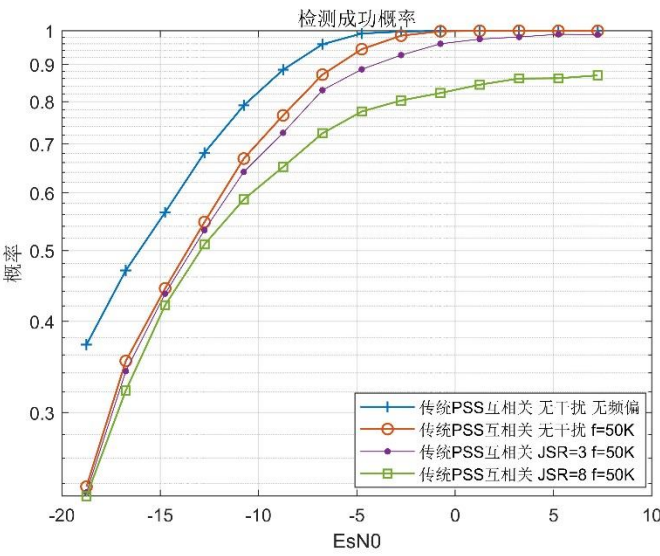


图 5 多普勒频偏为 50KHz 传统 PSS 互相关算法检测性能

Fig. 5 Detection performance of traditional PSS cross-correlation algorithm with Doppler frequency offset of 50KHz

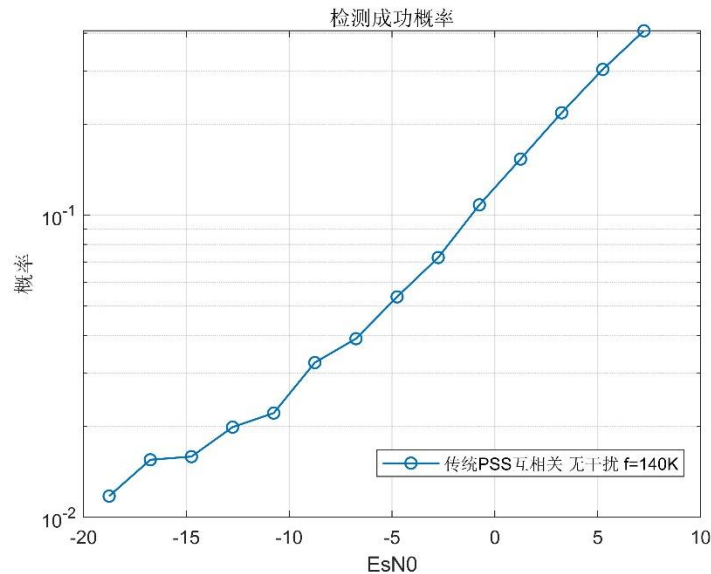


图 6 多普勒频偏为 140KHz 传统 PSS 互相关算法检测性能

Fig. 6 Detection performance of traditional PSS cross-correlation algorithm with Doppler frequency offset of 140KHz

时频二维搜索算法可以抵抗较大的频偏,如图 7 所示,干扰相同,多普勒频偏较小时,传统 PSS 互相关算法与时频二维搜索算法性能相近;但是当频偏较大时,该算法的性能优于传统 PSS 互相关算法。当频偏相同时,时频二维搜索算法在 JSR=8dB 的条件下检测概率只能达到 86.7%,比不加干扰降低了约 11%。可见干扰对通信系统的性能有较大的影响。

此外,由图 7 还可以观察到频偏为 140KHz 的时频二维搜索算法检测性能优于 50KHz,这是因为该算法的性能与归一化频偏大小有关,如图 8 所示,当归一化频偏接近于 0 或 1 等整数时,该算法检测成功概率最高,当归一化频偏接近 0.5/1.5...时,该算法的检测概率最低。即对于本文的帧结构,频偏接近 60KHz、180KHz...达到最低的检测性能,频偏接近 0KHz、120KHz...达到最高的检测性能,因此图 7 中频偏为 140KHz 的检测性能优于 50KHz 的检测性能。

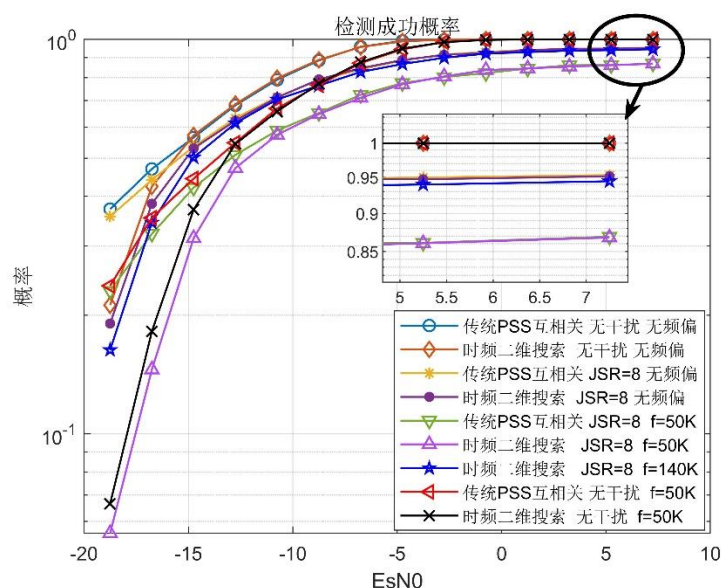


图 7 时频二维搜索算法检测性能

Fig. 7 Detection performance of time-frequency two-dimensional search algorithm

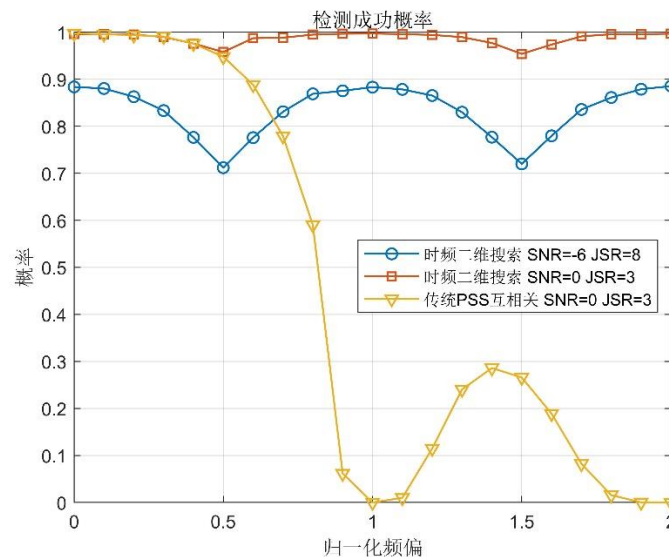


图8 时频二维搜索算法随归一化频偏检测性能

Fig. 8 Performance of time-frequency two-dimensional search algorithm with normalized frequency offset detection

3.3 频偏估计算法抗干扰性能分析

图9 仿真分析了不同程度干扰, 不同时间同步算法对频偏估计性能的影响, 通过均方误差 (Mean Square Error, MSE) 进行频偏估计误差评估。低信噪比下, 传统 PSS 互相关时间同步算法优于时频二维搜索算法, 所以先通过 PSS 互相关算法再进行频偏估计的 MSE 小于时频二维搜索算法; 对于高信噪比, 频偏较小时, 两个时间同步算法性能相近, 对频偏估计的影响较小; 但频偏较大时, 时间同步算法的抗干扰能力和抗频偏能力对频偏估计性能影响较大。当频偏为 50KHz, $E_s N_0 = 7.25\text{dB}$, $\text{JSR} = 3\text{dB}$ 时, MSE 约为 $1\text{e-}3$; 当频偏为 50KHz, $E_s N_0 = 7.25\text{dB}$, $\text{JSR} = 8\text{dB}$ 时, MSE 为 $6\text{e-}3$, 远高于不加干扰的情况。干扰越大, MSE 值越大, 说明频偏估计误差越大, 进一步会影响通信系统的解调性能, 降低系统的可靠性。

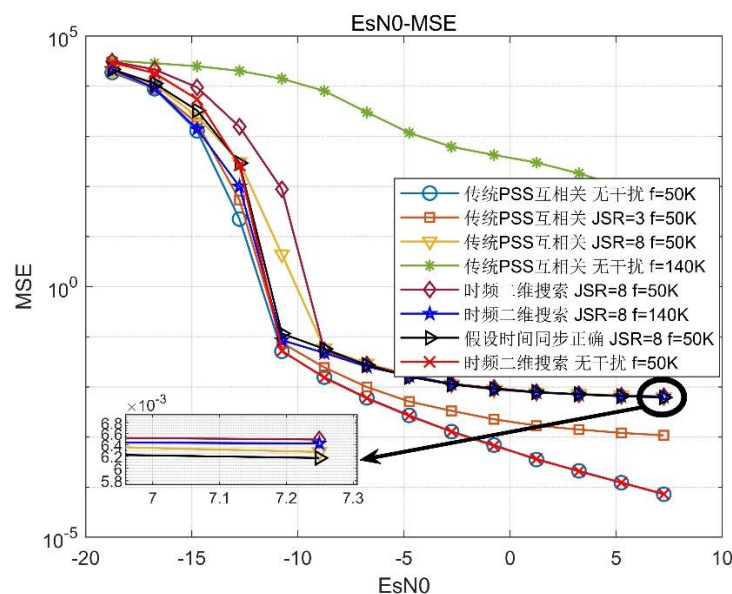


图9 不同时间同步算法对频偏估计的影响

Fig. 9 Influence of different time synchronization algorithms on frequency offset estimation

4 结论

本文给出了在强干扰的影响下, 根据 5G 通信系统的特点, 分析了常见时频同步算法的抗干扰能力。在干扰一定, 频偏较小的情况下, 时频二维搜索算法和传统 PSS 互相关算法性能接近, 频偏较大的情况下, 时频二维搜索算法的检测性能明显优于 PSS 互相关算法。而且随着干扰功率的增加, 两个算法的检测性能也会下降。JSR=3dB, 不加频偏时, 检测概率已经达不到 100%。综上所述, 人为恶意的强干扰影响下, 5G 同步信号的抗干扰能力有限, 对通信系统的性能会带来一定的影响。

[参考文献] (References)

- [1] 张越良. 5G 新空口下行同步和广播信道的仿真与 FPGA 实现[D]. 北京: 北京邮电大学, 2019.
- [2] 3GPP, TR38-211. NR Physical channels and modulation[S]. 3GPP: 3GPP, 1997.
- [3] CHANG K, LEE S. Robust OFDM-Based Synchronization Against Very High Fractional CFO and Time-Varying Fading[J]. IEEE Systems Journal, 2020, 14(3): 4047-4058.
- [4] FAN X G, YANG J, ZHANG W J. Time-Frequency Synchronization Design of OFDM Systems Based on CAZAC Sequence[A]. FAN X G. International Conference on Communications[C]. Tianjin: Information System and Computer Engineering, 2020. 55-58.
- [5] SIMON E P, ROS L, HIJAZI H. Joint Carrier Frequency Offset and Channel Estimation for OFDM Systems via the EM Algorithm in the Presence of Very High Mobility[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2012, 60(2): 754-765. 作者. 论文题目[J]. 刊名, 年, 卷(期): 起始页码-终止页码.
- [6] 范中涛. 基于空域滤波的导航接收机抗干扰技术研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2020.
- [7] 李成城. 导航接收机自适应抗干扰算法研究与实现[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2020.
- [8] 张琳. 卫星导航系统接收机抗干扰关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
- [9] ABDZADEH Z H, SHAYESTEH M G. Robust Timing and Frequency Synchronization for OFDM Systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2011, 60(8): 3646-3656.
- [10] 刘慧. 5G 通信信号下行同步检测技术研究[D]. 太原: 中北大学, 2022.
- [11] GARELLO R. Algorithms for New Radio synchronization layer functions (CFO correction, PSS, SSS)[D]. Italia: POLITECNICO DI TORINO, 2020.
- [12] WANG D, MEI Z, ZHANG H. A Novel PSS Timing Synchronization Algorithm for Cell Search in 5G NR System[J]. IEEE Access, 2021, PP(99): 1-1.
- [13] GOLNARI A, SHABANY M, NEZAMALHOSSEINI A. Design and implementation of time and frequency synchronization in LTE[J]. IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems, 2015, 23(12): 2970-2982.
- [14] 谭磊. 5G 低轨宽带卫星下行同步技术研究及实现[D]. 成都: 成都理工大学, 2021.
- [15] 郭秋阳. 5G 下行信号的同步与检测技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2019.
- [16] MORELLI M, KUO C C J, PUN M O. Synchronization techniques for orthogonal frequency division multiple access (OFDMA): A tutorial review[J]. Proceedings of the IEEE, 2007, 95(7): 1394-1427.