第 34 卷第 3 期　　计算机应用与软件　　Vol. 34 No. 3
2017 年 3 月　　Computer Applications and Software　　Mar. 2017

# 一类跳频序列集的最优构造

黄　波　张小华

（成都东软学院　四川 成都 611844）

**摘　要**　跳频扩频是主要的扩频编码技术之一，跳频序列在跳频码分多址系统中的作用至关重要。分圆理论由于具有良好的特性，在组合设计、良好的二元随机序列设计中得到了广泛应用。基于分圆理论，构造了一类关于 Peng-Fan 界最优的跳频序列集，节省了一个频隙，丰富了跳频序列集的构造方法。结果表明，该构造方法简单易行，对跳频通信系统性能的提高具有一定的指导意义。

**关键词**　跳频序列集　彭-范界　分圆理论　周期汉明相关　码分多址

**中图分类号**　TP393.04　　**文献标识码**　A　　DOI:10.3969/j.issn.1000-386x.2017.03.022

# OPTIMAL CONSTRUCTION OF FREQUENCY-HOPPING SEQUENCE SETS

Huang Bo　Zhang Xiaohua

(*Chengdu Neusoft University, Chengdu 611844, Sichuan, China*)

**Abstract**　Frequency-hopping (FH) spread spectrum is one of the main spread spectrum coding technologies. Furthermore, frequency-hopping sequences (FHS) play important roles in FH code division multiple access systems. Due to its good characteristics, the cyclotomy has been widely used in combinatorial designs and good designs of binary random sequences. Based on cyclotomy, a class of FHS set with Peng-Fan bounds is constructed, which can save a frequency gap and enrich the construction methods of FHS sets. The results show that this method is simple and easy to be implemented, and it has a certain guiding significance for improving the performance of FH communication system.

**Keywords**　Frequency hopping sequence set　Peng-Fan bound　Cyclotomy　Periodic hamming correlation　Code division multiple access

## 0　引　言

在无线通信系统中，跳频扩频和直接序列扩频是两种主要的扩频技术。跳频码分多址由于具有安全性、抗多址干扰等特性，其在蓝牙、军事无线电通信、移动通信以及现代雷达、声呐系统中得到了广泛应用[1]。通常情况下，如果两个或多个发送者在同一时隙发送相同的频隙，那么就产生了一次碰撞，相互之间的干扰就产生了。跳频序列用来指定在每个时隙被传输的频隙，所以，多个发送者之间的相互干扰与跳频序列之间的汉明相关是密切相关的，因而选择碰撞次数少的跳频序列（跳频序列集）有利于跳频通信系统性能的提高。好的跳频序列（跳频序列集）应具有以下特征：尽可能小的汉明相关特性；好的平衡性；尽可能长的周期；尽可能多的序列数目；尽可能大的复杂度；实现简单。

目前，一部分最优的跳频序列集已被学者们进行了广泛而深入的研究，例如：2011 年，Zhou 等[2]利用 $d$ 型函数及线性方程组的解等相关知识构造了三类关于 Peng-Fan 界[3]最优的跳频序列集，并讨论了所构造序列集的线性复杂度；2010 年，Ding 等[4]提出了基于编码理论构造跳频序列集的方法，拓展了跳频序列集设计的方法，其他构造方法请参考相关文献。分圆类在组合设计，二元序列设计中得到了广泛的运用，学者们对利用分圆理论来构造最优跳频序列集进行了相应研究。对于有限域 $F_q$，$q$ 是素数或素数方幂，令 $q-1=ef$，2005 年，Chu 等[5]首次利用分圆理论构造出了两类关于 Lempel-Greenberger 界[6]最优的跳频序列，其序列长度为 $q$，频隙个数为 $e+1$；之后，基于分圆理论的跳

收稿日期：2016－03－08。**黄波**，讲师，主研领域：网络通信，数字图像处理，软件工程。**张小华**，讲师。

频序列集基本上是在 Chu 方法上的引申;2008 年,基于分圆理论和离散对数函数, Ding 等[7]提出了一种最优的跳频序列设计方法,构造的序列长度为 $q-1$,频隙个数为 $e+1$ ;2009 年,Zhang 等[8]利用分圆理论、离散对数函数以及中国剩余定理,构造出了一类最优的跳频序列以及跳频序列集,序列长度为 $2(q-1)$ 频隙个数为 $e+1$;对于素数 $p$ ,2013 年 Wenli Ren [9]推广了 Zhang 和 Ding 的方法,构造出了一类最优的跳频序列集,序列的长度为 $p(q-1)$,频隙个数为 $e+1$ 。2013 年 Liu 等[10]提出了一种关于平均周期汉明相关界最优的跳频序列集, 同时研究了所构造的跳频序列集的汉明相关分布。本文中,我们利用分圆理论,提出了一种关于 Peng -Fan 界[3]最优的跳频序列集,序列的长度为 $q$,频隙个数为 $e$ ,显然,我们的方法节省了一个频隙,构造简单易行,具有一定的参考价值。

## 1 基本概念

在本文中,我们用符号 $(N,M,q,\lambda)$ 表示长度为 $N$,具有 $M$ 个跳频序列,频隙集中频隙个数为 $q$,最大周期汉明相关为 $\lambda$ 的跳频序列集。用符号 $(l,q,h)$ 表示长度为 $l$,频隙集中频隙个数为 $q$,最大周期汉明自相关为 $h$ 的跳频序列。

令 $F=\{f_1,f_2,\cdots,f_q\}$ 是一个具有 $q$ 个频隙的频隙集, $S$ 是一个具有 $M$ 个长度为 $N$ 的跳频序列集,对于任意两个频隙 $f_1$、$f_2$, 令:

$$h(f_1,f_2)=\begin{cases}1 & \text{如果 } f_1=f_2\\ 0 & \text{其他}\end{cases} \tag{1}$$

对于任意两个跳频序列 $x=(x_0,x_1,\cdots,x_{N-1})$, $y=(y_0,y_1,\cdots,y_{N-1})$, 任意正整数 $\tau$,$N0\leqslant\tau\leqslant N$,序列 $x$ 和 $y$ 在时延 $\tau$ 时的周期汉明相关定义如下:

$$H_{x,y}(\tau)=\sum_{k=0}^{N-1}h(x_k,y_{k+\tau})(0\leqslant\tau<N) \tag{2}$$

这里,所有的下标运算都是在模 $N$ 下进行的。

对于任意给定的跳频序列集 $S$,最大周期汉明自相关 $H_a(S)$ 和最大周期汉明互相关 $H_c(S)$ 分别定义如下:

$$\begin{aligned}H_a(S)&=\max_{1\leqslant\tau<N}\{H(x,x;\tau)\mid x\in S\}\\ H_c(S)&=\max_{0\leqslant\tau<N}\{H(x,y;\tau)\mid x,y\in S,x\neq y\}\end{aligned} \tag{3}$$

最大周期汉明相关 $H_m(S)$ 定义如下:

$$H_m(S)=\max\{H_a(S),H_c(S)\} \tag{4}$$

1974 年,Lempel and Greenberger[6]建立了关于单个跳频序列汉明自相关的理论界。

**引理 1**(Lempel-Greenberger 界[6]):对于长度为 $N$ ,定义在具有 $q$ 个频隙的频隙集上的任意跳频序列,汉明自相关满足下面的界:

$$H_a(S)\geqslant\left\lceil\frac{(N-r)(N+r-q)}{q(N-1)}\right\rceil \tag{5}$$

这里,$r$ 是 $N$ 模 $q$ 的最小非负剩余。显然, Lempel-Greenberger 界没有涉及跳频序列的个数。

**定义 1** 对于任意跳频序列 $(l,q,h)$,若 $h-1$ 使 Lempel-Greenberger 界(5)中的等号成立,则该序列关于 Lempel-Greenberger 界是渐进最优的。

2004 年,Peng and Fan[3]引入跳频序列个数 $M$ ,建立了在跳频序列集设计中广泛使用的关于最大周期汉明相关的理论界。

**引理 2**(Peng and Fan 界[3]):令 $S$ 是一个长度为 $N$,具有 $M$ 个跳频序列,定义在具有 $q$ 个频隙的频隙集上的跳频序列集,我们有:

$$H_m(S)\geqslant\frac{(NM-q)N}{(NM-1)q} \tag{6}$$

和:

$$H_m(S)\geqslant\frac{2INM-(I+1)Iq}{(NM-1)M} \tag{7}$$

这里 $I=\left\lfloor\frac{NM}{q}\right\rfloor$。

**定义 2** 对于任意跳频序列集 $(N,M,q,\lambda)$,若 $\lambda$ 使 Peng and Fan 界(式(6)、式(7))中的等号成立,则该跳频序列集关于 Peng and Fan 界是最优的。

## 2 最优跳频序列集构造

该部分,我们利用分圆理论[11]构造了一类关于 Peng-Fan 界最优的跳频序列集。

令 $F_q$ 是一个具有 $q$ 个元素的有限域,同时设存在两个正整数 $e$ 和 $f$,满足 $ef=q-1$,$\alpha$ 是有限域 $F_q$ 的一个本原元。$C_0=\langle\alpha^e\rangle$ 是由 $\alpha^e$ 产生的 $F_q$ 的乘法子群,有限域 $F_q$ 的 $e$ 阶分圆类定义如下:

$$C_i=\{\alpha^{i+ks}:i=0,\cdots,e-1;k=0,\cdots,f-1\} \tag{8}$$

对于 $0\leqslant i\neq j\leqslant e-1$ ,有:

$$\begin{aligned}&C_i\cap C_j=\varnothing\\ &\cup_{i=0}^{e-1}C_i=F_q^*\end{aligned} \tag{9}$$

对于任意正整数 $n$,$C_{i+ne}=C_i$。进一步,关于有限域 $F_q$ 的 $e$ 阶分圆数定义如下:

$$(i,j)_e=|(C_i+1)\cap C_i| \tag{10}$$

显然,最多有 $e^2$ 个不同的 $e$ 阶分圆数。

我们将会利用下面的引理来计算所设计的跳频序列集的汉明自相关和汉明互相关。

**引理 3** 令 $q=ef+1$ 是一个素数或素数方幂,$C_i$

是有限域 $F_q$ 的 $e$ 阶分圆类，我们有：

$$\sum_{i=0}^{e-1}(i+k,i)_e=\begin{cases}f-1 & \text{如果 } k=0\\ f & \text{否则}\end{cases}\tag{11}$$

本文构造最优跳频序列集的方法如下：

**Step1**　选择一个素数或素数方幂 $q$，选择两个正整数 $e$ 和 $f$，满足 $q-1=ef$，设 $C_i$ 是有限域 $F_q$ 的 $e$ 阶分圆类。

**Step2**　对于 $0\leqslant i\leqslant e-1$，利用分圆类 $C_i$ 得到如下的数集

$$\bar{G}_i=C_i-1$$

显然下式成立：

$$\cup_{i=0}^{e-1}\bar{G}_i=\cup_{i=0}^{e-1}(C_i-1)=F_q/\{q-1\}\tag{12}$$

**Step3**　对于 $0\leqslant k\leqslant e-1$，定义跳频序列集 $S=\{s_k(t)\}_{t=0}^{q-1}$ 如下：

$$\begin{cases}s_k(t)=\lambda & \text{如果 } t=q-1\\ s_k(t)=i & \text{如果 } t\in\bar{G}_{(i+k)\bmod e}\end{cases}\tag{13}$$

其中：$0\leqslant k\leqslant e-1$。

**定理 1**　根据 Peng-Fan 界，我们有：如果 $\lambda\in Z_e$，当 $f$ 是偶数时，$S$ 是一个最优的跳频序列集，其参数为 $(q,e,e,f+1)$。根据 Lempel-Greenberger 界：跳频序列集 $S$ 中的每个跳频序列是渐进最优的。

证明：如果 $\lambda\in Z_e$，不失一般性，设 $\lambda=i_0$，$0\leqslant i_0\leqslant e-1$，令 $\bar{G}_{i_0}=\bar{G}_{i_0}\cup\{q-1\}$，$s_i$ 是跳频序列集 $S$ 中的任意一个跳频序列，根据周期汉明自相关的定义，在时延 $\tau$ 时，我们有：

$$\begin{aligned}H_{s_i,s_i}(\tau)&=\sum_{i=0}^{e-1,i\neq i_0}|(\bar{G}_i+\tau)\cap\bar{G}_i|+|(\bar{G}_{i_0}+\tau)\cap\bar{G}_{i_0}|\\&=\sum_{i=0}^{e-1}|(C_i+\tau)\cap C_i|+|\{\tau\}\cap C_{i_0}|+\\&\quad|(C_{i_0}+\tau)\cap\{0\}|+|\{\tau\}\cap\{0\}|\\&=f-1+\Delta\end{aligned}\tag{14}$$

其中 $\Delta=|\{\tau\}\cap C_{i_0}|+|C_{i_0}\cap\{-\tau\}|$。

下面我们确定 $\Delta$ 的值。

令 $\tau=\alpha^l$，$0\leqslant l\leqslant q-2$，因为 $\alpha^{\frac{q-1}{2}}=-1$，可得 $-\tau=\alpha^{\frac{q-1}{2}+l}$，我们分以下两种情况加以讨论。

1）如果 $\tau$ 和 $-\tau$ 均属于分圆类 $C_{i_0}$。

当 $\tau$ 跑遍 $\{1,2,\cdots,q-1\}$ 时，$l$ 跑遍 $\{0,2,\cdots,q-2\}$，因为 $f$ 是偶数，故存在 $l$，使得 $l\equiv l+\frac{ef}{2}\equiv i_0 \bmod e$ 成立，也即 $l\equiv l+\frac{q-1}{2}\equiv i_0\bmod e$ 成立，按照分圆类的定义，$\tau$ 和 $-\tau$ 同时属于分圆类 $C_{i_0}$。此时：

$$H_{s_i}(\tau)=f+1\tag{15}$$

2）$\tau$ 和 $-\tau$ 之一属于 $C_{i_0}$，或者 $\tau$ 和 $-\tau$ 均不属于 $C_{i_0}$。

因为 $\tau$ 取遍 $\{1,2,\cdots,q-1\}$ 中的每个值，显然存在这样的 $\tau$，使这两种情况都成立，所以：

$$H_{s_i}(\tau)=\begin{cases}f & \text{如果 } \tau\in C_{i_0} \text{ 或 } -\tau\in C_{i_0}\\ f-1 & \text{否则}\end{cases}\tag{16}$$

对于 $0\leqslant u\leqslant e-1$，令 $s_i$、$s_{i+u}$ 是跳频序列集 $S$ 中的任意两个跳频序列，根据周期汉明互相关的定义，在时延 $\tau$ 时，我们有：

$$\begin{aligned}H_{s_i,s_{i+u}}(\tau)&=\sum_{i=0}^{e-1,i\neq i_0}||\bar{G}_i+\tau|\cap\bar{G}_{i+u}|+\\&\quad|(\bar{G}_{i_0}+\tau)\cap\bar{G}_{i_0+u}|+|(\bar{G}_{i_0-u}+\tau)\cap\bar{G}_{i_0}|\\&=\sum_{i=0}^{e-1}|((C_i-1)+\tau)\cap(C_{i+u}-1)|+\\&\quad|(\{p-1\}+\tau)\cap(C_{i_0+u}-1)|+\\&\quad|(C_{i_0-u}-1+\tau)\cap\{p-1\}|\\&=\sum_{i=0}^{e-1}|(C_i+\tau)\cap C_{i+u}|+|\{\tau\}\cap C_{i_0+u}|+\\&\quad|C_{i_0-u}\cap\{-\tau\}|\end{aligned}\tag{17}$$

为了计算 $H_{s_i,s_{i+u}}(\tau)$ 的值，我们分以下三种情况讨论。

1）当 $\tau$ 跑遍 $\{1,2,\cdots,q-1\}$ 时，若存在 $\tau$，使 $\tau\in C_{i_0+u}$，且 $-\tau\in C_{i_0-u}$ 成立，则必有：

$$\begin{cases}l\equiv i_0+u \bmod e\\ l+\dfrac{q-1}{2}\equiv i_0-u\bmod e\end{cases}\tag{18}$$

所以：

$$\begin{cases}l\equiv i_0-\dfrac{q-1}{4}\equiv i_0-\dfrac{ef}{4}\bmod e\\ u\equiv-\dfrac{q-1}{4}\equiv-\dfrac{ef}{4}\bmod e\end{cases}\tag{19}$$

其中，$f$ 是偶数，如果 $f\equiv0\bmod2$，但 $f\neq0\bmod4$，此时，$\frac{ef}{4}$ 不是整数，这样的 $l$ 和 $u$ 不存在；如果 $f\equiv0\bmod2$，$e\equiv0\bmod2$，但 $f\neq0\bmod4$，此时，$u\equiv0\bmod e$，但 $1\leqslant u\leqslant e-1$，这样的 $u$ 不存在；如果 $f\equiv0\bmod4$ 则 $u\equiv0\bmod e$，所以，对于任意的 $l$，$\tau\in C_{i_0+u}$ 且 $-\tau\in C_{i_0-u}$ 不成立。

$$H_{s_i,s_{i+u}}(\tau)=f\tag{20}$$

2）当 $\tau$ 跑遍 $\{1,2,\cdots,q-1\}$ 时，存在 $l\equiv i_0+u\bmod e$，使得 $\tau\in C_{i_0+u}$。

$$H_{s_i,s_{i+u}}(\tau)=f+1\tag{21}$$

3）当 $\tau$ 跑遍 $\{1,2,\cdots,q-1\}$ 时，存在 $l\equiv i_0-\frac{q-1}{2}-u\bmod e$，使得 $-\tau\in C_{i_0-u}$。

$$H_{s_i,s_{i+u}}(\tau)=f+1\tag{22}$$

基于以上分析，跳频序列集 $S$ 的最大周期汉明相关为：

$$H_m(S) = f + 1 \qquad 0 \leqslant \tau \leqslant q-1 \tag{23}$$

下面分析跳频序列集 $S$ 关于 Peng-Fan 界是最优的。把相关参数代入 Peng-Fan 界有：

$$H_m \geqslant \left\lceil \frac{(MN-q)N}{(MN-1)q} \right\rceil = \left\lceil \frac{(eq-e)q}{(eq-1)e} \right\rceil$$

$$= \left\lceil \frac{ef+1}{e} - \frac{(e-1)q}{(eq-1)e} \right\rceil$$

$$= f + \left\lceil \frac{f}{(eq-1)} \right\rceil = f + 1 \tag{24}$$

显然，达到了 Peng-Fan 界的下界，所以关于 Peng-Fan 界，$S$ 是最优的跳频序列集。

由于对于任意的 $q$，均有 $q \equiv 1 \bmod e$，故 $r = 1$。把相关参数代入 Lempel-Greenberger 界有：

$$H_m \geqslant \left\lceil \frac{(N-r)(N+r-q)}{q(N-1)} \right\rceil$$

$$= \left\lceil \frac{(q-1)(q+1-e)}{e(q-1)} \right\rceil$$

$$= \left\lceil \frac{q+1-e}{e} \right\rceil = \left\lceil \frac{q-1+2-e}{e} \right\rceil$$

$$= \left\lceil f - \frac{e-2}{e} \right\rceil = f \tag{25}$$

其中，$H_m(S) - 1$ 使 Lempel-Greenberger 界中的等号成立，故 $S$ 中的每个跳频序列是渐进最优的。

定理得证。

下面的例子说明了我们的构造方法。令素数 $p = 19$，正整数 $e = 3$，$f = 6$，显然 $p = ef+1$，对有限域进行分圆，在分圆类的基础上得到 3 个数集 $\bar{G}_i$：

$$\bar{G}_0 = \{1,7,8,11,12,18\}$$

$$\bar{G}_1 = \{2,3,5,14,16,17\}$$

$$\bar{G}_2 = \{4,6,9,10,13,15\}$$

令 $S(19) = 2$，得到长度为 19，个数为 3，定义在有限域 $F_{19}$ 上的跳频序列集为：

$$S = \left\{ \begin{aligned} s_1 &= \{2,0,1,1,2,1,2,0,0,2,2,0,0,2,1,2,1,1,0\} \\ s_2 &= \{2,2,0,0,1,0,1,2,2,1,1,2,2,1,0,1,0,0,2\} \\ s_3 &= \{2,1,2,2,0,2,0,1,1,0,0,1,1,0,2,0,2,2,1\} \end{aligned} \right\}$$

对于时延 $\tau$，$0 \leqslant \tau \leqslant 18$，汉明相关分别如下：

汉明自相关为：

$$H_{s_1}(\tau) = \{5,5,5,7,5,7,5,5,7,7,5,5,7,5,7,5,5,5\}$$

$$H_{s_2}(\tau) = \{7,5,5,5,5,5,7,7,5,5,7,7,5,5,5,5,5,7\}$$

$$H_{s_3}(\tau) = \{5,7,7,5,7,5,5,5,5,5,5,5,5,7,5,7,7,5\}$$

汉明互相关为：

$$H_{s_1,s_2}(\tau) = \{7,6,6,7,6,7,7,7,7,7,7,7,7,6,7,6,6,7,1\}$$

$$H_{s_1,s_3}(\tau) = \{6,7,7,7,7,7,6,6,7,7,6,6,7,7,7,7,7,6,1\}$$

$$H_{s_2,s_1}(\tau) = \{7,6,6,7,6,7,7,7,7,7,7,7,7,6,7,6,6,7,1\}$$

$$H_{s_2,s_3}(\tau) = \{7,7,7,6,7,6,7,7,6,6,7,7,6,7,6,7,7,7,1\}$$

$$H_{s_3,s_1}(\tau) = \{7,7,7,6,7,6,7,7,6,6,7,7,6,7,6,7,7,7,1\}$$

$$H_{s_3,s_2}(\tau) = \{6,7,7,7,7,7,6,6,7,7,6,6,7,7,7,7,7,6,1\}$$

最大周期汉明相关为：

$$H_m(S) = 7$$

可以验证，关于 Peng-Fan 界，$S$ 是最优的跳频序列集。关于 Lempel-Greenberger 界，$S$ 中每个跳频序列是渐进最优的。

## 3 结　语

基于分圆理论，提出了一种关于 Peng-Fan 界最优的跳频序列集的构造方法。本文所构造的跳频序列集与参考文献中所构造的跳频序列集的相关比较如表 1 所示。

**表 1　本文构造的跳频序列集与已知跳频序列集的比较**

| 文献 | 长度 | 个数 | 频隙个数 | 最大汉明相关 | 限制条件 | Peng-Fan 界 | Lempel-Greenberger 界 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| [5] | $p$ | $e$ | $e+1$ | $f$ | $p$ 为素数，$2 \leqslant 4; f \leqslant 4; e+2$ | 最优 | 最优 |
| [8] | $2p$ | $\lfloor e/2 \rfloor$ | $e+1$ | $f$ | $p$ 为素数，$2 \leqslant 4; f \leqslant 4; (e+2)/6$ | 最优 | 渐进最优 |
| [7] | $p-1$ | $e$ | $e+1$ | $f$ | $p$ 为素数，$f \leqslant 4; e-1$ | 最优 | 最优 |
| [9] | $n(p-1)$ | $\lfloor e/n \rfloor$ | $e+1$ | $nf$ | $p$ 为素数，$\gcd(n,ef) = 1n(f+1) \leqslant 4; e$ | 最优 | 渐进最优 |
| [12] | $np$ | $\lfloor e/n \rfloor$ | $e+1$ | $nf$ | $p$ 为素数，$nf \leqslant 4; e$ | $n=1$ 或 $n \neq 0$；$1, f=1$ 最优其余情况渐进最优 | 最优 |
| 定理 1 | $q$ | $e$ | $e$ | $f+1$ | $q$ 为素数或素数方幂，$f$ 是偶数 | 最优 | 渐进最优 |

本文方法简单易行，丰富了跳频序列集的构造方法。利用分圆理论构造更多最优的其它类跳频序列集将是我们进一步研究的内容。

（下转第 159 页）

型效果。底部四个按钮分别实现图像左右移和放大缩小功能。

## 4 结 语

基于 OpenGL ES 的 Andorid 移动终端三维地图绘制方法研究是未来移动定位可视化的研究热点,也是个人真实场景导航定位应用的关键技术。伴随数字城市和智慧城市建设的不断推进,对数据获取和显示提出更高要求,移动终端三维实景模型的快速建立与良好的人机交互对于推动数字化进程具有明显优势,相关技术的发展具有良好应用前景。

## 参 考 文 献


[1] 吕东方,张正华,刘平,等. 智能交通多接口智能终端研究与实现[J]. 无线电工程,2015,45(8):87-90.

[2] Haseloff S. Designing adaptive mobile applications[C]//Pros of the 9th Euro micro Workshop on Parallel and Distributed Processing,2001:131-138.

[3] 王跃. 我国移动智能终端操作系统平台发展研究[J]. 信息通信技术,2012(4):30-34.

[4] 曾锡山,范冰冰. 基于 Android 移动终端的车辆导航地图匹配算法研究[J]. 华南师范大学学报(自然科学版),2015,47(4):160-164.

[5] 张国平,王建玺,董桂林. 基于 Android 平台的手机地图服务设计[J]. 计算技术与自动化,2015,34(1):111-115.

[6] 于连庆. 基于触控操作方式的大气科学数据可视化系统技术研究与实现[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版),2014,6(6):530-538.

[7] 王柯,张文诗,马宏斌. 基于 Android 平台的移动 GIS 地图服务模式研究[J]. 地理信息世界,2014,21(5):84-90.

[8] Liu Feng,Janssens Davy,Wets Geert,et al. Annotating mobile phone location data with activity purposes using machine learning algorithms[J]. Expert System with Applications,2012,40(8):3299-3311.

[9] Perea-Ortega Jose M,Lloret Elena,Alfonso Urena-Lopez L,et al. Application of Text mmarization techniques to the Geographical Information Retrieval task[J]. Expert System with Applications,2012,40(8):2966-2974.

[10] Rodes William,Gugerty Leo. Effects of Electronic Map Displays and Individual Differences in Ability on Navigation Performance[J]. Human Factors,2012,54(4):589-599.

[11] 李金贵,翁敬农. 数字地球环境下矢量数据可视化方法研究与应用[J]. 测绘通报,2015(6):112-115.

[12] 许林然. 基于 Android 的校园三维导览系统的设计与实现[J]. 哈尔滨师范大学自然科学学报,2015,31(2):77-80,115.

[13] 张天巧. 基于机载倾斜摄影数据的自动贴纹理方法研究[J]. 测绘通报,2015(6):69-71.

[14] 王柯,马宏斌,王一圣. 基于 Android 平台的软件开发若干关键技术研究[J]. 测绘与空间地理信息,2014,37(9):14-16,24.

[15] 汪峙峰,薛源. 安卓 Android 与苹果 ios 优劣与发展前景[J]. 计算机光盘软件与应用,2011(16):34-34.

[16] 梁彩虹,刘爽. 基于 Android 平台实现实时地点通讯及导航[J]. 电子设计工程,2013,21(22):40-42.


(上接第 126 页)

## 参 考 文 献


[1] Fan P Z,Darnell M. Sequence Design for Communications Applications[M]. Research Studies Press (RSP),Wiley,London (1996).

[2] Zhengchun Zhou,Xiaohu Tang,Daiyuan Peng,et al. New constructions for optimal sets of frequency hopping sequences[J]. IEEE Transactions On Inform. Theory,2011,57(6):3831-3840.

[3] Daiyuan Peng,Pingzhi Fan. Lower bounds on the Hamming auto-and cross correlations of frequency-hopping sequences[J]. IEEE Transactions on Information Theory,2004,50(9):2149-2154.

[4] Cunsheng Ding,FujiHara,R Fujiwara,et al. Sets of frequency hopping sequences: bounds and optimal constructions[J]. IEEE Trans Inform Theory,2009,55(7):3297-3304.

[5] Chu W,Colbourn C J. Optimal frequency-hopping sequences via Cyclotomy[J]. IEEE Transactions on Information Theory,2005,51(3):1139-1141.

[6] Lempel A,Greenberger H. Families of sequences with optimal Hamming correlation properties[J]. IEEE Transactions on Information Theory,1974,20(1):90-94.

[7] Cunsheng Ding,Jianxing Yin. Sets of optimal frequency-hopping sequences[J]. IEEE Transactions on Information Theory,2008,54(8):3741-3745.

[8] Yun Zhang,Pinhui Ke,Shengyuan Zhang. Optimal frequency hopping sequences based on Cyclotomy[C]//First International Workshop on Education Technology and Computer Science,2009,1:1122-1126.

[9] Wenli Ren,Fangwei Fu,Zhengchun Zhou. New sets of frequency-hopping sequences with optimal Hamming correlation[J]. Des. Codes Cryptogr,2014,72(2):423-434.

[10] Fang Liu,Daiyuan Peng,Zhengchun Zhou. A new frequency-hopping sequence set based upon generalized Cyclotomy[J]. Des. Codes Cryptogr,2012,69(2):247-259.

[11] Storer T. Cyclotomy and Difference Sets[M]. Chicago,IL: Markham,1967.

[12] 徐善顶,曹喜望,许广魁. 一类周期为素数倍数的跳频序列集[J]. 电子学报,2015,43(10):1930-1935.