

УДК 621.396

Ошибки линий положения для различных методов определения направления на источник излучения

И.Ю. Анненкова, А.С. Грибанов

Аннотация

Выведены математические выражения для сравнения методов измерения направления на источник излучения по погрешности измерения разности фазы сигнала и ее производных, приведены графики скорости изменения измеряемой величины и выражения для погрешности измерения положения источника излучения на координатной плоскости относительно измерителей.

Ключевые слова

Пеленгование, разностно-фазовый метод, доплеровский метод, погрешность измерения направления, линии равных ошибок, среднеквадратическая ошибка

Введение

Измерение геометрической величины, характеризующей местоположение источника излучения (в частности, направление на источник излучения), связано с погрешностями, зависящими от положения источника излучения относительно измерителя. Линии равных ошибок представляются линиями положения, семейство которых можно рассматривать как линии уровня плоского скалярного поля геометрической величины U [1]. Скорость изменения этой величины на плоскости XOY характеризуется выражением (1):

$$|\text{grad} U| = \sqrt{\left(\frac{\partial U}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial U}{\partial y}\right)^2}, \quad (1)$$

где x, y – переменные дифференцирования.

Значение скорости изменения U используется для нахождения ошибки линии положения (2):

$$\Delta n = \frac{\Delta U}{|\text{grad} U|}$$

(2)

Цель работы – исследование влияния геометрического фактора на ошибку измерения линий положения источников излучения на плоскости.

Разностно-фазовый метод широко применяется при измерении направления на источник излучения относительно неподвижных или подвижных измерителей.

Линии положения постоянной разности расстояний для разностно-фазового метода определения направления (рисунок 1) определяются выражением (3):

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \Delta R, \quad (3)$$

где ΔR – разность расстояний ($R1 - R2$),

λ – длина волны,

α – угол направления на источник излучения,

b – расстояние между приемниками А и В (база).

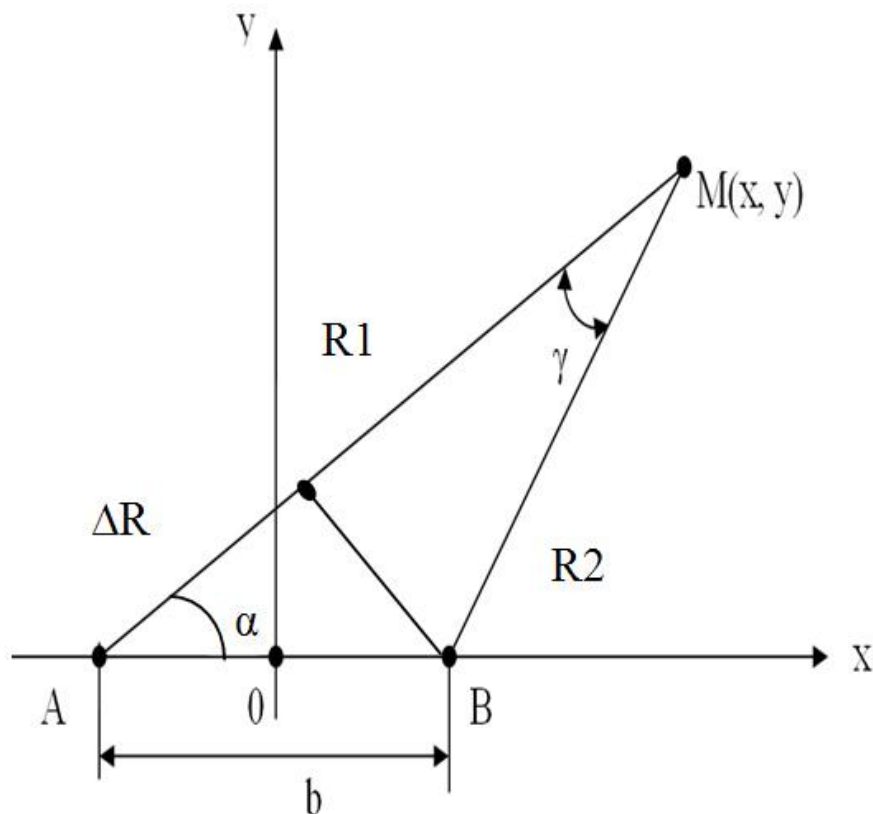


Рисунок 1 - Определение разности расстояний от источника излучения до двух приемников линий положения источника излучения

Ошибка измерения линий положения определяется выражением (4)

$$\sigma = \frac{\lambda \cdot \sigma_{\varphi}}{4\pi \cdot \sin \frac{\gamma}{2}}, \quad (4)$$

где σ_{φ} – погрешность измерения разности фаз.

Скорость измерения разности фаз по осям x и y определяется выражением (5):

$$|\text{grad } \Delta R| = \sqrt{2 \left(-\cos \gamma \right)} = 2 \sin \frac{\gamma}{2}, \quad (5)$$

где γ – угол между направлениями на приемники относительно источника излучения M .

Семейство линий положения в соответствии с выражением (5) показаны на рисунке 2:

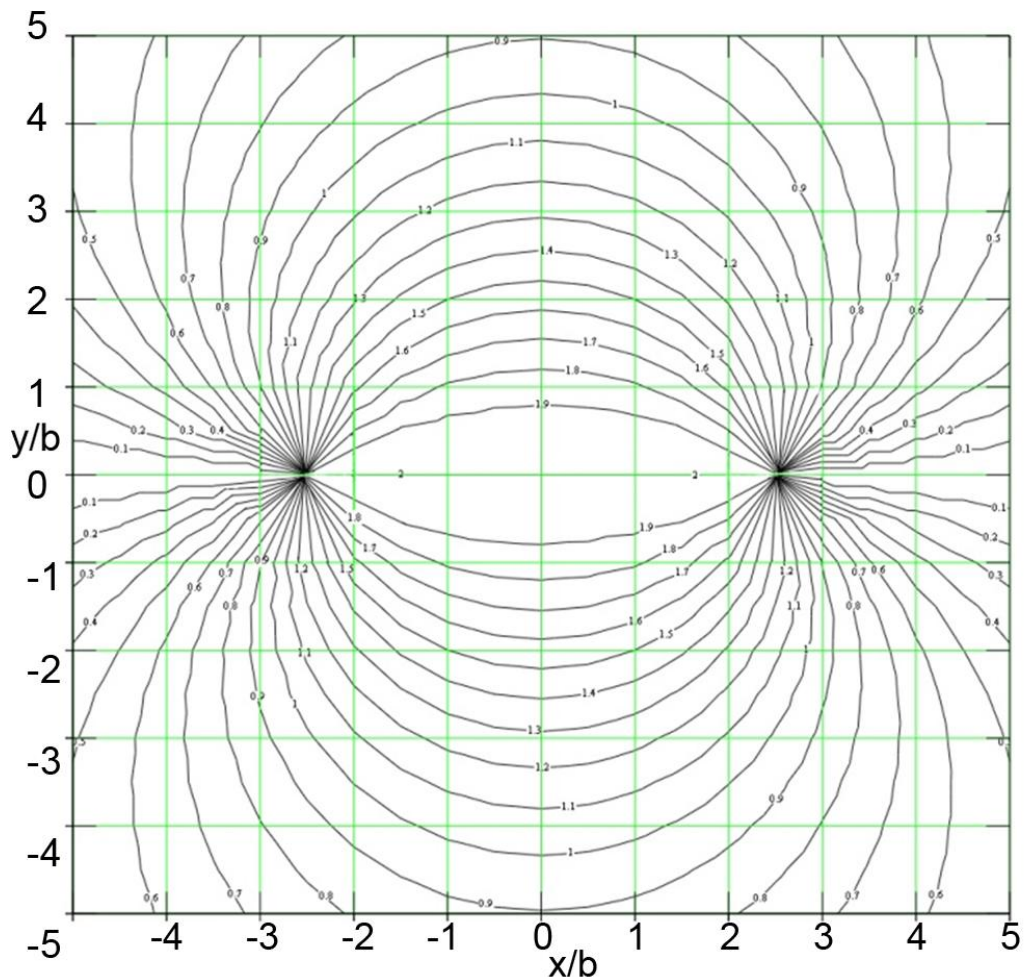


Рисунок 2 – Линии, характеризующие скорость изменения разности фаз

Для определения дальности необходимо измерить крутизну фронта падения волны, то есть скорость изменения Доплера (рисунок 3). Методы определения направления, основанные на измерении доплеровского смещения частоты источника излучения или скорости изменения частоты, характеризуются различной геометрией ошибок [2].

Для разностно-доплеровского метода линии равных разностей определения направления представляются выражением (6):

$$\Delta f = f_{\partial 1} - f_{\partial 2} = \frac{V}{\lambda} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2) = \frac{V}{\lambda} \cdot \left(\frac{x + \frac{b}{2}}{R_1} - \frac{x - \frac{b}{2}}{R_2} \right), \quad (6)$$

где α_1 - направление на источник излучения относительно первого приемника,

α_2 - направление на источник излучения относительно второго приемника,

V_1 – скорость передвижения первого приемника,

V_2 – скорость передвижения второго приемника ($V_1 = V_2 = V$),

$$\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2 = -2 \cdot \sin \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2} \cdot \sin \frac{\alpha_1 - \alpha_2}{2} = -2 \cdot \sin \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2} \cdot \sin \frac{\gamma}{2}.$$

После преобразования (6) получаем выражение (7):

$$\Delta f = \frac{V}{\lambda} \cdot \sin \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2} \cdot \sin \frac{\gamma}{2} \quad (7)$$

Семейство линий положения:

$$\begin{aligned} |\text{grad} \Delta f| &= \sqrt{\left(\frac{y^2}{R_1^3} - \frac{y^2}{R_2^3} \right)^2 - \left(\frac{\left(x + \frac{b}{2} \right) y}{R_1^3} - \frac{\left(x - \frac{b}{2} \right) y}{R_2^3} \right)^2} = \sqrt{y^2 \left(\frac{1}{R_1^4} + \frac{1}{R_2^4} - \frac{2}{R_1^2 R_2^2} \cdot \frac{y^2 + x^2 - \left(\frac{b}{2} \right)^2}{R_1 \cdot R_2} \right)} = \\ &= |y| \sqrt{\frac{1}{R_1^4} + \frac{1}{R_2^4} - \frac{2}{R_1^2 R_2^2} \cdot \cos \gamma} \end{aligned}$$

В итоге получаем (8) (рисунок 4):

$$|\text{grad} \Delta f| = \frac{|y|}{R_1^2 \cdot R_2^2} \cdot \sqrt{R_2^4 + R_1^4 - 2 \cdot R_1^2 \cdot R_2^2 \cdot \cos \gamma}, \quad (8)$$

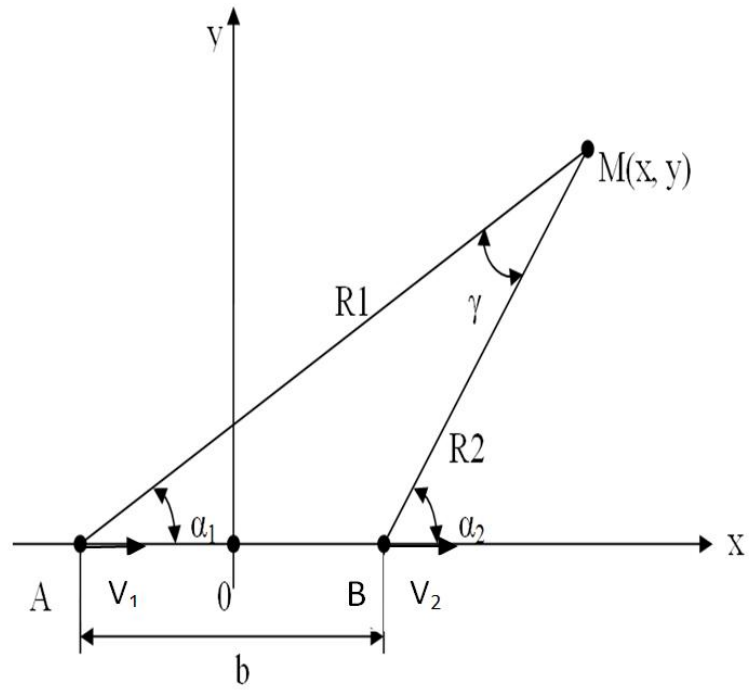


Рисунок 3 - Определение разности частоты сигнала источника излучения, принятого движущимися приемниками

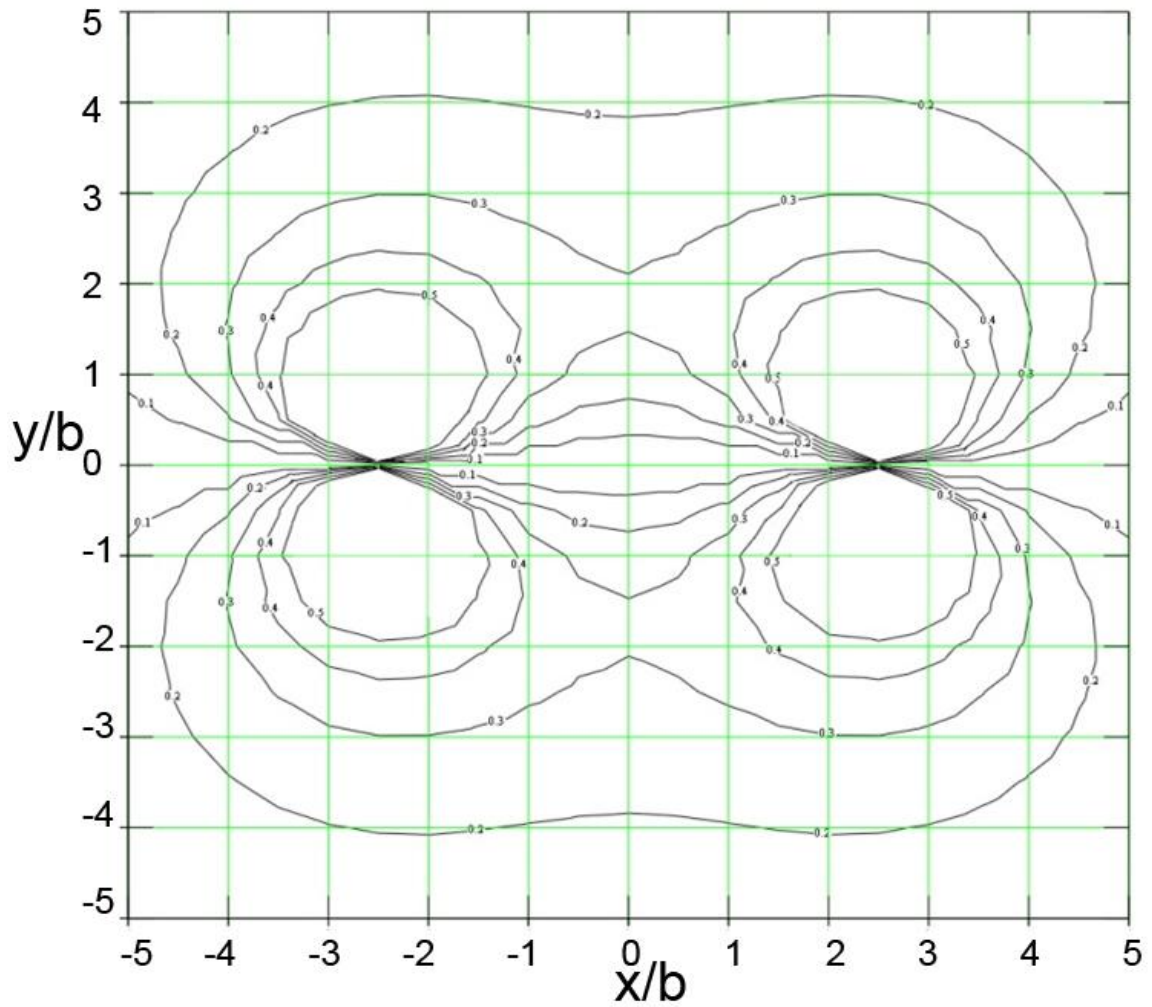


Рисунок 4 – Линии, характеризующие скорость изменения частоты

Среднеквадратическая ошибка линии положения (9):

$$\sigma_{x,y} = \frac{\lambda}{V} \cdot \frac{R_1^2 \cdot R_2^2 \cdot \sigma_{\Delta f}}{y \cdot \sqrt{R_2^4 + R_1^4 - 2 \cdot R_1^2 \cdot R_2^2 \cdot \cos \gamma}}, \quad (9)$$

где $\sigma_{\Delta f}$ – погрешность измерения разностной частоты.

Для метода определения линий положения, основанного на измерении скорости изменения частоты, линии равных значений представляются выражением (9) (рисунок 5):

$$V_f = \frac{V^2}{\lambda} \cdot \frac{\sin \alpha}{R} = \frac{V^2}{\lambda} \cdot \frac{y^2}{(x^2 + y^2) \sqrt{x^2 + y^2}}, \quad (10)$$

где V_f – скорость изменения частоты.

Семейство линий положения определяет скорость изменения частоты по осям x и y:

$$|\text{grad}D| = \sqrt{\left(-\frac{3xy^2}{(x^2 + y^2) \sqrt{x^2 + y^2}} \right)^2 + \left(\frac{2y(x^2 + y^2) - 3y^3}{(x^2 + y^2) \sqrt{x^2 + y^2}} \right)^2} = \frac{y}{(x^2 - y^2)^2} \cdot \sqrt{4x^2 + y^2}$$

После преобразований получаем (10) (рисунок 6):

$$|\text{grad}D| = \frac{\sin \alpha}{R} \cdot \sqrt{4 \cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha}, \quad (10)$$

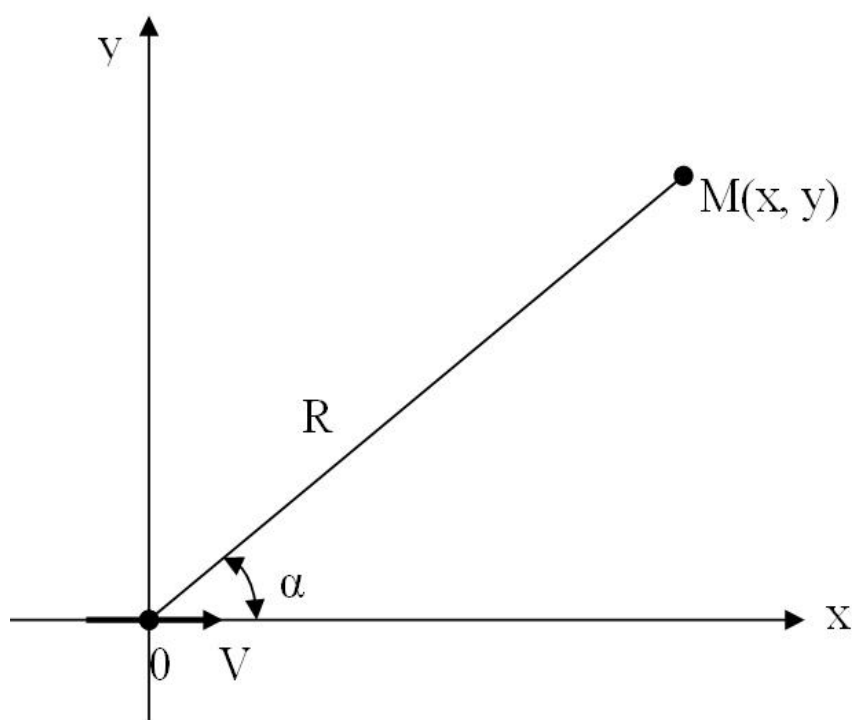


Рисунок 5 - Определение скорости изменения частоты сигнала источника излучения, принимаемого подвижным приемником

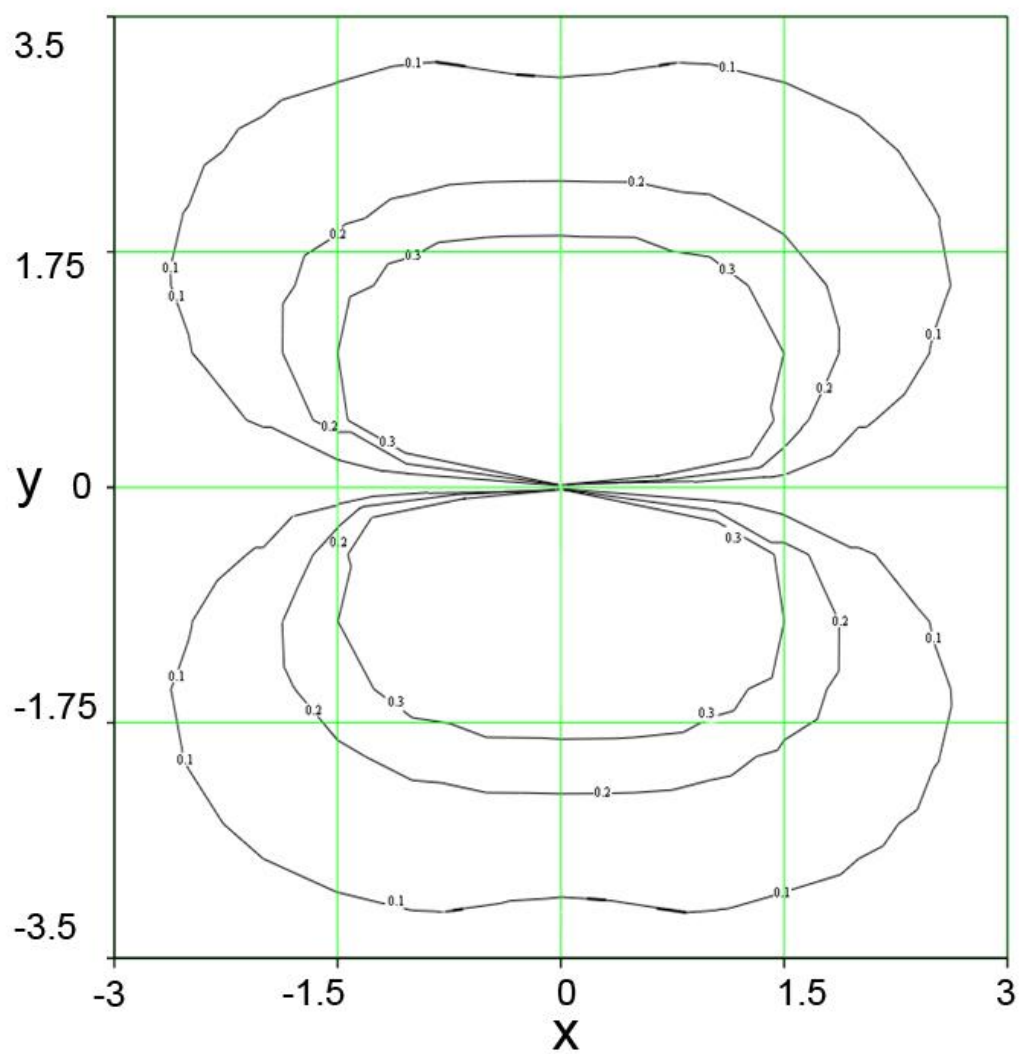


Рисунок 6 – Линии, характеризующие ускорение изменения частоты (11):

$$\sigma_{x,y} = \frac{\lambda}{V^2} \cdot \frac{R \cdot \sigma_V}{\sin \alpha \sqrt{4 \cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha}}, \quad (11)$$

где σ_V – погрешность измерения скорости изменения частоты.

Выводы

Выбор метода определения направления на источник излучения определяется несколькими факторами: минимизацией погрешности, однозначностью измерения, числом измерителей и геометрическими факторами, влияющими на погрешность измерения.

Наименьшей погрешностью измерения обладает разностно-фазовый метод, однако для реализации малой погрешности необходимы меры, устраняющие неоднозначность измерения.

Доплеровский метод обеспечивает однозначность измерения, но погрешность измерения направления на источник излучения возрастает.

Метод, основанный на оценке скорости изменения частоты, позволяет однозначно определять линии положения источника излучения с одной позиции. Этот метод прост в реализации, но погрешность измерения превышает погрешность измерения доплеровского и разностно-фазового методов.

Библиографический список

1. Сайбель А.Г. Основы радиолокации. – М.: Сов. радио. 1961.-384 с.
2. Грибанов А.С. Методы высокоточного определения координат точечного излучателя // Вопросы радиоэлектроники, сер. СОИУ, 2003, вып.1, с.97-106.

Сведения об авторах

Анненкова Ирина Юрьевна ,аспирант Московского авиационного института (государственного технического университета); blumenstrasse7@yandex.ru

Грибанов Александр Сергеевич – доцент РадиоВТУЗ МАИ, к.т.н., gribanov@inbox.ru