

УДК 537.872.32, 51.73.

## **АППАРАТНАЯ ФУНКЦИЯ ДВУХЭЛЕМЕНТНОГО КОРРЕЛЯЦИОННОГО РАДИОМЕТРА С НЕЗАПОЛНЕННОЙ АПЕРТУРОЙ**

**А.В.Лебедев, В.В.Гладун, А.В.Котов, Р.А.Павлов, Ю.А.Пирогов, Д.А.Тищенко,  
Чжэн Сюй-фэн**

**Физический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова**

Получена 22 июля 2010 г.

**Аннотация.** Рассчитана и построена аппаратная функция двухэлементного корреляционного радиометра с незаполненной апертурой. Проведено экспериментальное исследование радиометра, измерены диаграммы направленности при различных внешних условиях. Разработанная математическая модель с хорошей точностью совпадает с экспериментальными результатами. Обсуждаются причины, влияющие на точность измерения диаграмм направленности двухэлементных радиометров.

**Ключевые слова:** корреляционный радиометр, аппаратная функция, миллиметровый диапазон.

### **Введение**

Радиометры миллиметрового диапазона находят применение во многих областях современной жизни. Одна из них – разработка систем всепогодного радиовидения. Однако для использования радиометра в системах радиовидения, для синтеза изображения наблюдаемой сцены необходимо точно знать его аппаратную функцию. В данном исследовании изучается схема двухэлементного корреляционного радиометра, который имеет преимущество в чувствительности и более узкой диаграмме направленности по сравнению с одноэлементным радиометром. Рассчитана диаграмма направленности радиометра и произведено ее сравнение с экспериментальной.

## Диаграмма направленности системы сдвоенных круглых рупоров

**Выбор дальней зоны.** Расчет диаграммы направленности (ДН) проводится в дальней зоне, так как это значительно упрощает схему и позволяет при расчете ДН радиометра использовать ряд значительно упрощенных функций. В то же время данное упрощение не вносит значительных ограничений на использование результатов расчета, поскольку для радиометров миллиметрового диапазона исследуемые объекты находятся, как правило, в дальней зоне.

### Система двух круглых рупоров

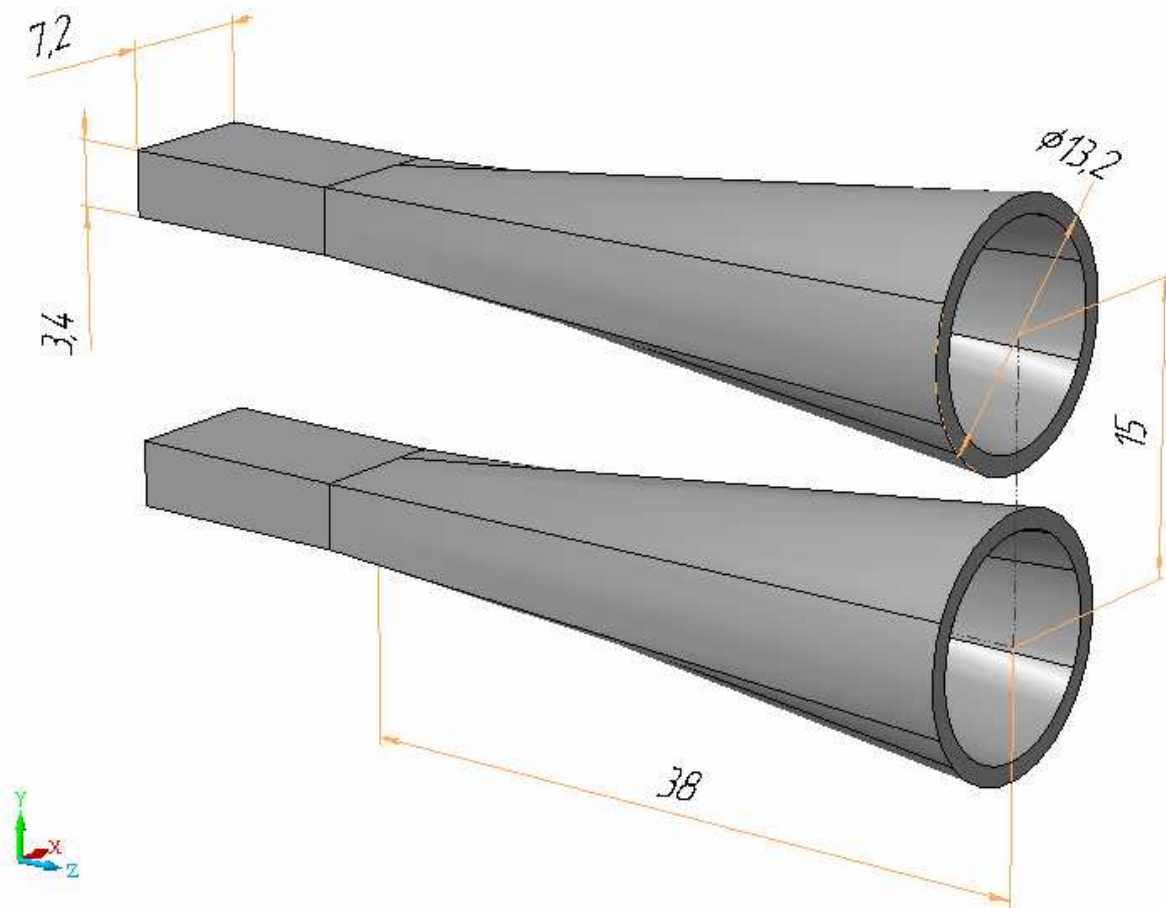


Рис. 1. Система сдвоенных круглых рупоров.

Рассмотрим поля в раскрыве одного круглого рупора. Электрическое и магнитные поля в раскрыве, согласно [1, 2] имеют вид

$$\vec{E}(\rho', \phi') = E_\rho \hat{\rho} + E_\phi \hat{\phi} = E_0 \cdot e^{-j[k\rho'/2L]} \left[ \frac{J_1(h\rho')}{\rho'} \sin \phi' \hat{\rho} + J_1'(h\rho') \cos \phi' \hat{\phi} \right],$$

$$\vec{H}(\rho', \phi') = \frac{1}{\eta} \hat{z} \times \vec{E} = \frac{E_0}{\eta} \cdot e^{-j[k\rho'/2L]} \left[ -J_1'(h\rho') \cos \phi' \hat{\rho} + \frac{J_1(h\rho')}{\rho'} \sin \phi' \hat{\phi} \right],$$

откуда можно найти эквивалентные плотности электрического и магнитного токов [3]

$$\vec{J}_s(\rho', \phi') = \hat{z} \times \vec{H} = \frac{E_0}{\eta} \cdot e^{-j[k\rho'/2L]} \left[ -\frac{J_1(h\rho')}{\rho'} \sin \phi' \hat{\rho} - J_1'(h\rho') \cos \phi' \hat{\phi} \right],$$

$$\vec{M}_s(\rho', \phi') = \vec{E} \times \hat{z} = E_0 \cdot e^{-j[k\rho'/2L]} \left[ J_1'(h\rho') \cos \phi' \hat{\rho} - \frac{J_1(h\rho')}{\rho'} \sin \phi' \hat{\phi} \right].$$

Рассчитаем поля в дальней зоне. Векторные электрический и магнитный потенциалы в дальней зоне составляют:

$$\vec{A}(r, \theta, \varphi) = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{e^{-jkr}}{r} \cdot \vec{A}(\theta, \varphi),$$

$$\vec{\Phi}(r, \theta, \varphi) = \frac{\varepsilon_0}{4\pi} \cdot \frac{e^{-jkr}}{r} \cdot \vec{F}(\theta, \varphi),$$

где

$$\vec{A}(\theta, \varphi) = \int_{x'=-a/2}^{a/2} \int_{y'=-a/2}^{a/2} \vec{J}_s(x', y') \cdot e^{jk\Delta} dx' dy' = A_\theta \hat{\theta} + A_\phi \hat{\phi},$$

$$\vec{F}(\theta, \varphi) = \int_{x'=-a/2}^{a/2} \int_{y'=-a/2}^{a/2} \vec{M}_s(x', y') \cdot e^{jk\Delta} dx' dy' = F_\theta \hat{\theta} + F_\phi \hat{\phi},$$

$$\Delta = \rho' \sin \theta \cos(\phi - \phi').$$

$$\left\{ \begin{array}{l} A_\theta(\theta, \phi) = \frac{1}{\eta} \int_{\rho'=0}^{a/2} \int_{\phi'=0}^{2\pi} [-E_\rho \cos \theta \cos(\phi - \phi') - E_\phi \cos \theta \sin(\phi - \phi')] e^{jk\Delta} \rho' d\rho' d\phi', \\ A_\phi(\theta, \phi) = \frac{1}{\eta} \int_{\rho'=0}^{a/2} \int_{\phi'=0}^{2\pi} [E_\rho \sin(\phi - \phi') - E_\phi \cos(\phi - \phi')] e^{jk\Delta} \rho' d\rho' d\phi', \\ F_\theta(\theta, \phi) = \int_{\rho'=0}^{a/2} \int_{\phi'=0}^{2\pi} [-E_\phi \cos \theta \cos(\phi - \phi') - E_\rho \cos \theta \sin(\phi - \phi')] e^{jk\Delta} \rho' d\rho' d\phi', \\ F_\phi(\theta, \phi) = \int_{\rho'=0}^{a/2} \int_{\phi'=0}^{2\pi} [-E_\phi \sin(\phi - \phi') - E_\rho \cos(\phi - \phi')] e^{jk\Delta} \rho' d\rho' d\phi', \end{array} \right.$$

$$E_\rho = E_0 \cdot e^{-j[k\rho'^2/2L]} \frac{J_1(h\rho')}{\rho'} \sin \phi',$$

$$E_\phi = E_0 \cdot e^{-j[k\rho'^2/2L]} J_1'(h\rho') \cos \phi'.$$

В таком случае электрические и магнитные поля в дальней зоне имеют вид [4]

$$\begin{cases} E_r = 0, \\ E_\theta = -jk \frac{e^{jkr}}{4\pi r} (\eta_0 A_\theta + F_\phi), \\ E_\phi = jk \frac{e^{jkr}}{4\pi r} (-\eta_0 A_\phi + F_\theta), \end{cases}$$

а ПЛОТНОСТЬ МОЩНОСТИ

$$\vec{P} = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \vec{E} \times \vec{H}^* = P_\theta \hat{\theta} + P_\phi \hat{\phi},$$

где

$$P_\theta = |A_\theta|^2 + \frac{|F_\phi|^2}{\eta_0} + 2 \operatorname{Re} \frac{A_\theta F_\phi^*}{\eta_0},$$

$$P_\phi = |A_\phi|^2 + \frac{|F_\theta|^2}{\eta_0} - 2 \operatorname{Re} \frac{A_\phi F_\theta^*}{\eta_0}.$$

Фаза электрического поля равна

$$\text{в } \theta \text{ направлении} \quad \tan^{-1} \left( \frac{\operatorname{Im} E_\theta}{\operatorname{Re} E_\theta} \right),$$

$$\text{в } \phi \text{ направлении} \quad \tan^{-1} \left( \frac{\operatorname{Im} E_\phi}{\operatorname{Re} E_\phi} \right).$$

Упростим интегралы:

$$A_\theta(\theta, \phi) = \frac{1}{\eta} \int_{\rho'=0}^{a/2} \int_{\phi'=0}^{2\pi} [-E_\rho \cos \theta \cos(\phi - \phi') - E_\phi \cos \theta \sin(\phi - \phi')] e^{jk\Lambda} \rho' d\rho' d\phi',$$

$$E_\rho = E_0 \cdot e^{-j[k\rho^2/2L]} \frac{J_1(h\rho')}{\rho'} \sin \phi',$$

$$E_\phi = E_0 \cdot e^{-j[k\rho^2/2L]} J_1'(h\rho') \cos \phi'.$$

Подставляя сюда  $E_\rho$  и  $E_\phi$  найдем

$$A_\theta = \frac{E_0}{\eta} \left\{ \int -\frac{J_1(h\rho')}{\rho'} \cos \theta \cdot e^{-j[k\rho'^2/2L]} \left[ \int \sin \phi' \cos(\phi - \phi') e^{j\alpha \cos(\phi - \phi')} d\phi' \right] \rho' d\rho' - \right. \\ \left. \int J_1'(h\rho') \cos \theta \cdot e^{-j[k\rho'^2/2L]} \left[ \int \cos \phi' \sin(\phi - \phi') e^{j\alpha \cos(\phi - \phi')} d\phi' \right] \rho' d\rho' \right\},$$

где  $\alpha = k\rho' \sin \theta$ .

Интегрируя по  $\phi'$  и считая, что  $p = \phi' - \phi$ , получаем

$$\begin{aligned} \int \sin \phi' \cos(\phi - \phi') e^{j\alpha \cos(\phi - \phi')} d\phi' &= \int \frac{1}{2} (\sin \phi + \sin 2p \cos \phi + \cos 2p \sin \phi) e^{j\alpha \cos p} d\phi' \\ &= \frac{1}{2} [2\pi J_0(\alpha) \sin \phi - 2\pi J_2(\alpha) \sin \phi] = \pi \sin \phi [J_0(\alpha) - J_2(\alpha)], \\ \int \cos \phi' \sin(\phi - \phi') e^{j\alpha \cos(\phi - \phi')} d\phi' &= \int -\frac{1}{2} (-\sin \phi + \sin 2p \cos \phi + \cos 2p \sin \phi) e^{j\alpha \cos p} d\phi' \\ &= \frac{1}{2} [2\pi J_0(\alpha) \sin \phi + 2\pi J_2(\alpha) \sin \phi] = \pi \sin \phi [J_0(\alpha) + J_2(\alpha)]. \end{aligned}$$

Учитывая, что

$$\begin{cases} \int_0^{2\pi} \cos(x \cos \phi) d\phi = 2\pi J_0(x), \\ \int_0^{2\pi} \sin(x \cos \phi) d\phi = 0, \\ \int_0^{2\pi} \cos 2\phi e^{jx \cos \phi} d\phi = -2\pi J_2(x), \\ \int_0^{2\pi} \sin 2\phi e^{jx \cos \phi} d\phi = 0, \end{cases}$$

получаем

$$\begin{aligned} A_\theta &= -\frac{E_0}{\eta} \pi \cos \theta \sin \phi \cdot I_1, \\ A_\phi &= -\frac{E_0}{\eta} \pi \cos \phi \cdot I_2, \\ F_\theta &= -E_0 \pi \cos \theta \sin \phi \cdot I_2, \\ F_\phi &= -E_0 \pi \cos \phi \cdot I_1, \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} I_1 &= \int_{\rho'=0}^{a/2} \left\{ \frac{J_1(h\rho)}{\rho} [J_0(\alpha) - J_2(\alpha)] + J_1'(h\rho) [J_0(\alpha) + J_2(\alpha)] \right\} e^{-jk \frac{\rho^2}{2L}} \rho' d\rho', \\ I_2 &= \int_{\rho'=0}^{a/2} \left\{ \frac{J_1(h\rho)}{\rho} [J_0(\alpha) + J_2(\alpha)] + J_1'(h\rho) [J_0(\alpha) - J_2(\alpha)] \right\} e^{-jk \frac{\rho^2}{2L}} \rho' d\rho'. \end{aligned}$$

Итак, диаграмма направленности одного круглого рупора имеет вид

$$\begin{cases} E_r = 0, \\ E_\theta = -jk \frac{e^{jkr}}{4\pi r} (\eta_0 A_\theta + F_\phi) = jk \frac{e^{jkr}}{4r} E_0 \sin \phi \left[ \frac{\eta}{\eta_0} \cos \theta + 1 \right] \cdot I_1, \\ E_\phi = jk \frac{e^{jkr}}{4\pi r} (-\eta_0 A_\phi + F_\theta) = jk \frac{e^{jkr}}{4r} E_0 \cos \phi \left[ \cos \theta + \frac{\eta}{\eta_0} \right] \cdot I_2. \end{cases}$$

Теперь рассмотрим два одинаковых сонаправленных круглых рупора. Пусть входное напряжение на них составляет  $V_1$ ,  $V_2$ , а уровень сигнала на выходе радиометра  $V_0$  соответственно. Обозначим разницу электрической длины двух антенн  $l$ . Полагая одинаковой интенсивность входных сигналов для каждого канала, получаем [4]

$$V_2 = V_1 \cdot e^{i\psi},$$

$$\psi = k(d \sin \theta \cdot \sin \phi + l),$$

и для выходного напряжения радиометра

$$V_0(\theta, \varphi) = \frac{1}{2} \operatorname{Re}(|V_1| \cdot |V_2^*|) \sim |\bar{E}|^2 e^{-i\psi}.$$

Численное моделирование диаграммы направленности одного рупора и двух коррелированных рупоров показало, что имеет место значительное сужение диаграммы направленности во втором случае (рис. 2).

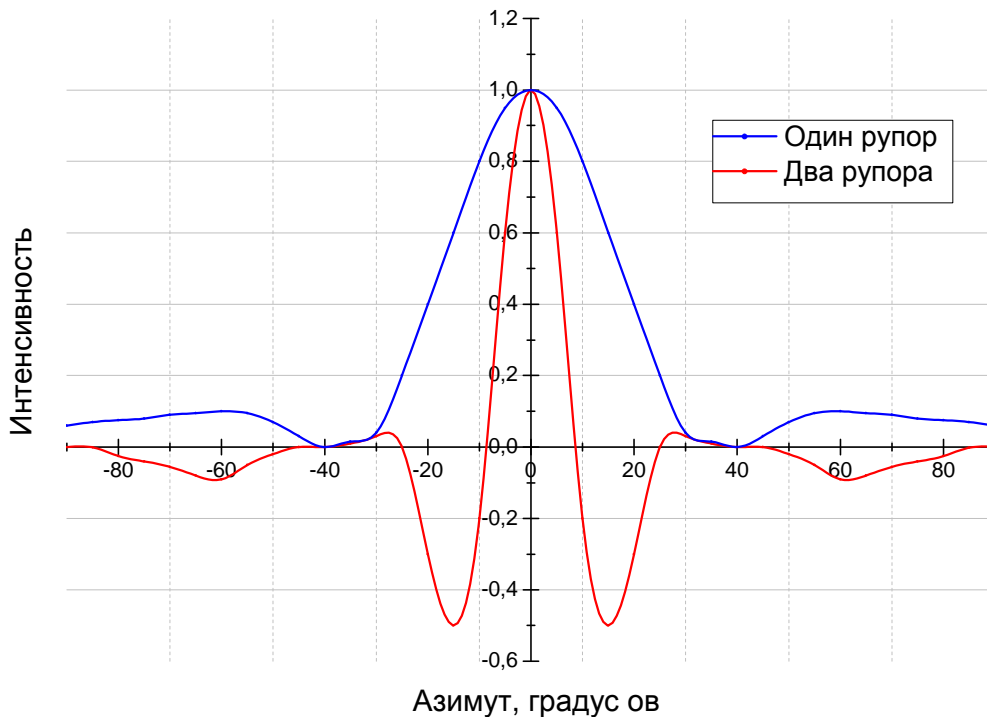


Рис. 2. Диаграммы направленности одного и двух коррелированных рупоров.

Таким образом, получена формула, позволяющая построить зависимость выходного сигнала радиометра от его азимутального угла, учитывающая разницу электрических длин рупоров. Дальнейшее сопоставление с

экспериментальными данными позволяет оценивать точность и качество функционирования реального радиометра и его компонентов[5].

### Измерение диаграммы направленности двухэлементного корреляционного радиометра миллиметрового диапазона

В эксперименте использовался радиометр 8-мм диапазона (рис. 3).

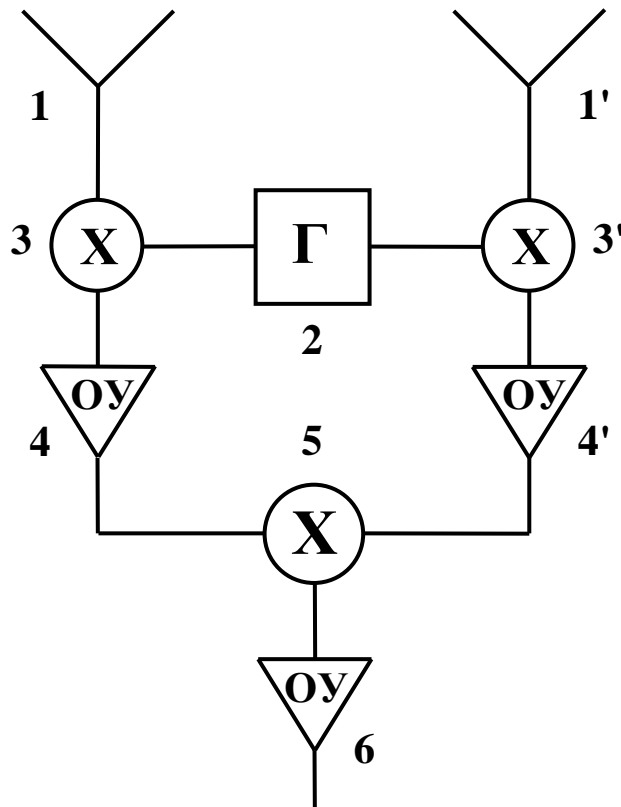


Рис. 3. Блок-схема установки.

Радиометр состоит из двух одинаковых приемных каналов 1 и 1', гетеродина 2 на диоде Ганна и трех смесителей 3, 3' и 5, из которых 3 и 3' действуют на рабочей частоте радиометра, а 5 на пониженной промежуточной частоте. Каждый канал состоит из круглого приемного рупора, сигнал которого поступает на смеситель, где смешивается с гетеродинным сигналом от диода Ганна 2 и усиленный после этого операционным усилителем 4 (4') попадает на следующий смеситель 5, где смешивается с сигналом другого канала. После смесителя 5 выходной сигнал дополнительно усиливается и поступает на выход радиометра 6. Рабочая частота диода Ганна составляет 33,78 ГГц,

соответственно на ней работают смесители для каждого из каналов, а смеситель между каналами и последующий операционный усилитель работают на частоте порядка одного гигагерца. При создании установки возникали проблемы из-за большой чувствительности усилителей схемы и сильной подверженности помехам. Для их решения пришлось частично поместить плату радиометра в металлический корпус, а также разделить питание для диода Ганна и основной схемы экранированными проводами.

Внешне радиометр представляет плоскую прямоугольную плату с жестко закрепленными на ней двумя приемными рупорами и прочими электронными компонентами схемы. Плата радиометра укреплена на поворотном устройстве, которое позволяет вращать ее в горизонтальной, а также вертикальной плоскости относительно оси, проходящей параллельно рупорам. На поворотном устройстве вдоль каждой из осей нанесены шкалы, позволяющие с точностью до половины градуса измерить азимут и угол места. Для автоматизации измерений применялся персональный компьютер, позволивший значительно повысить точность экспериментальных данных. Общий вид установки представлен на рис. 4.

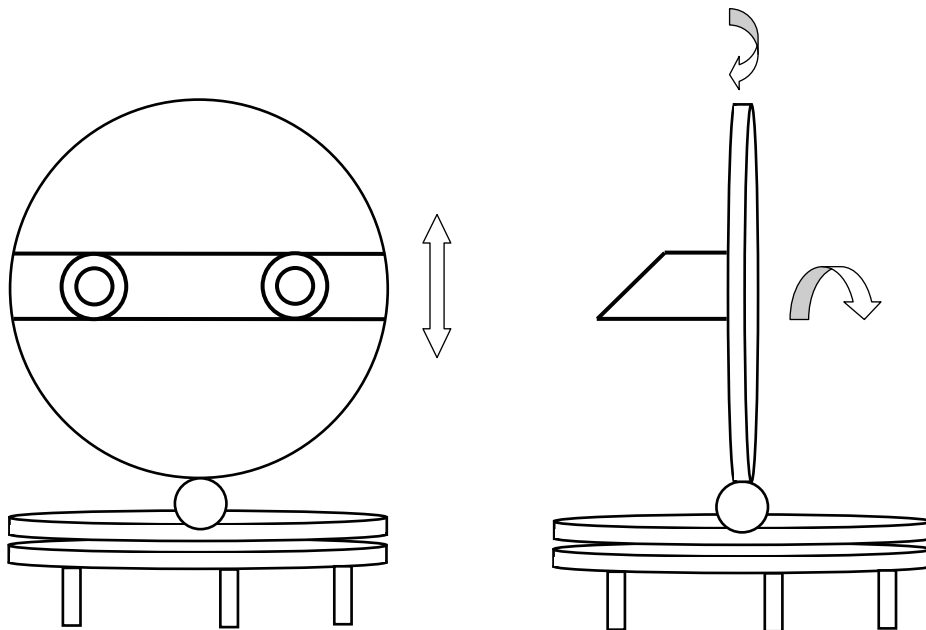


Рис. 4. Общий вид установки.



Измерения проводились на открытом воздухе. Вид сверху на расположение генератора и радиометра представлен на рис. 5.

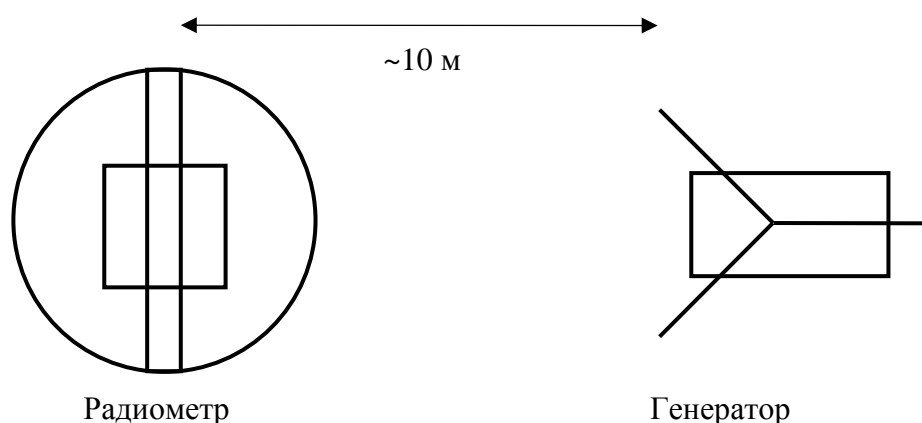


Рис. 5. Вид сверху на генератор и радиометр.

Между генератором и радиометром было расстояние 10 метров, что заведомо соответствовало дальней зоне радиометра. Генератор был установлен на треноге и поднят на высоту около двух метров, чтобы снизить влияние отражения от поверхности земли. Было проведено несколько серий измерений в различное время суток и при различных взаимных положениях радиометра и генератора

### **Результаты эксперимента и сравнение их с данными моделирования**

Проведено несколько серий экспериментов в различное время суток. После первого измерения диаграммы направленности радиометра было проведено сравнение ее с расчетными данными (рис. 6).

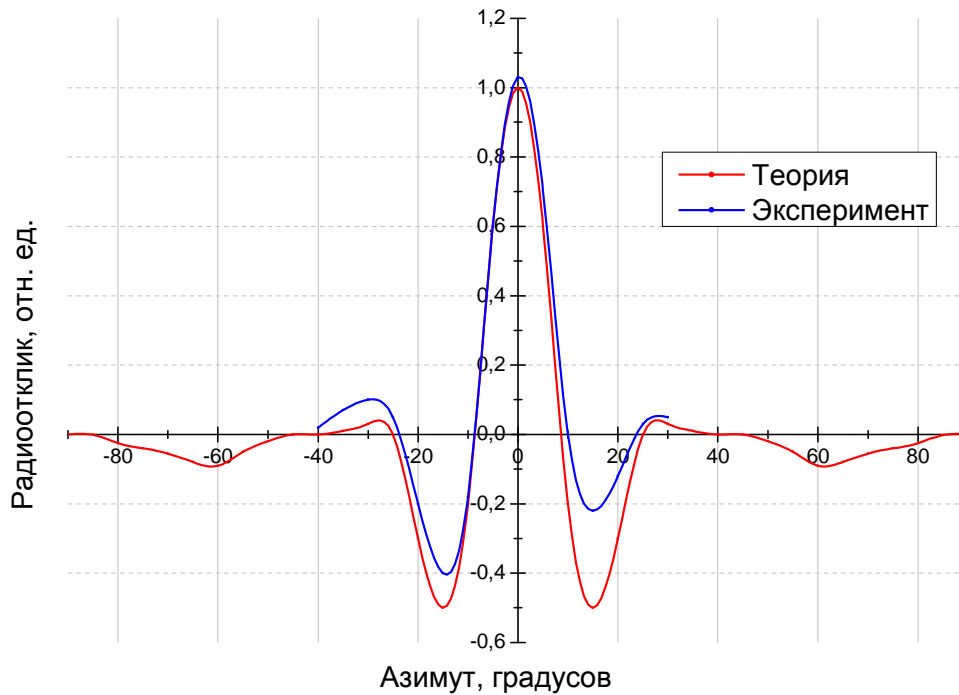


Рис. 6. Сравнение экспериментальной ДН с теоретической.

Теория достаточно хорошо описывала эксперимент, однако непонятным оставалось различие боковых лепестков измеренной и расчетной диаграмм.

Погрешность эксперимента минимизировалась за счет многократно измеренных диаграмм направленности во всех экспериментах с различными внешними параметрами, которые совпали друг с другом с достаточно большой точностью. Погрешность составляла величину, значительно меньшую, чем различие между смоделированными и экспериментальными ДН. Результаты приведены на рис. 7.

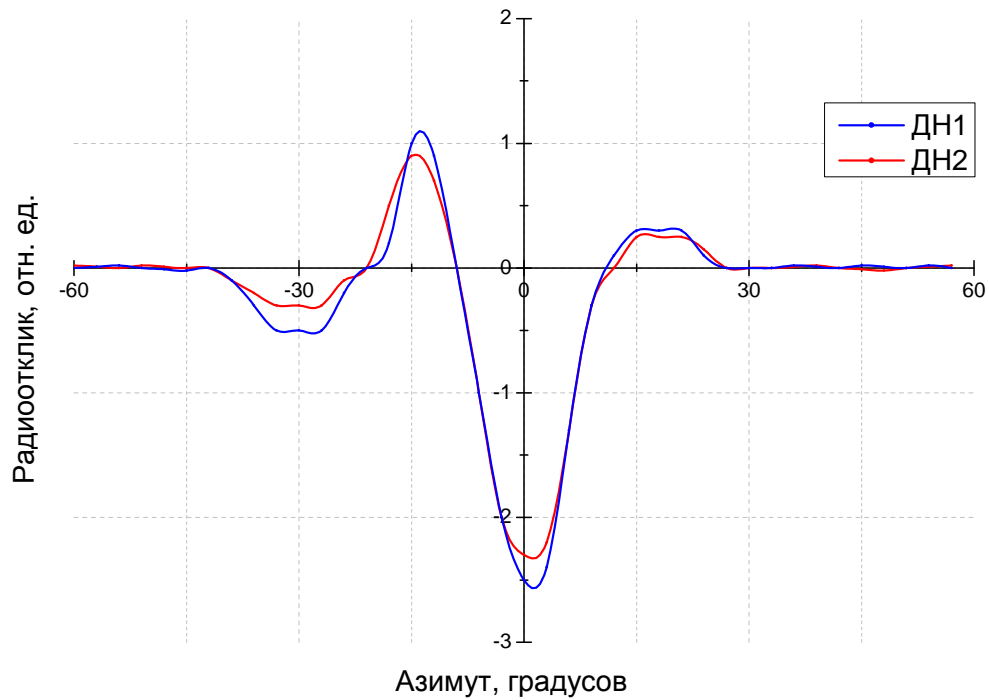


Рис. 7. Экспериментальные диаграммы направленности при различных внешних условиях.

Для проверки гипотезы о том, что различие в величине боковых лепестков вызвано разной электрической длиной для каждого из рупоров, было решено провести измерения, во-первых, с перевернутым на  $180^\circ$  относительно горизонтальной плоскости радиометром, а во-вторых, с переключенными друг с другом каналами от рупоров к смесителям. Если бы гипотеза оказалась верной, то первая ДН оказалась бы зеркальной по отношению ко второй и третьей. Проведенный эксперимент убедительно доказал правильность данной гипотезы и позволил рассчитать разницу в электрической длине для обоих рупоров. Результаты представлены на рис. 8.

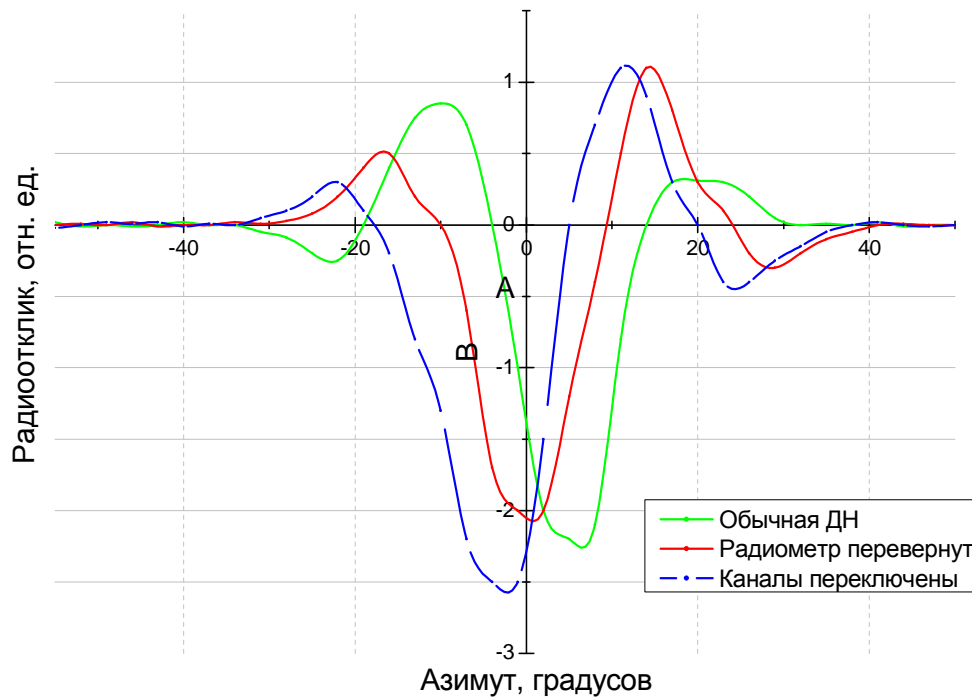


Рис. 8. Диаграммы направленности для обычного радиометра, перевернутого и радиометра с переключенными каналами.

Заметный сдвиг между максимумами объясняется в первом и втором случае небольшим сдвигом биссектрисы геометрического центра рупоров и центра поворотного устройства, а в первом и третьем двойной разницей в электрической длине для каналов. После вычисления электрической длины стало возможным рассчитать диаграмму направленности, более точно соответствующую данному радиометру, что и было проделано (рис. 9).

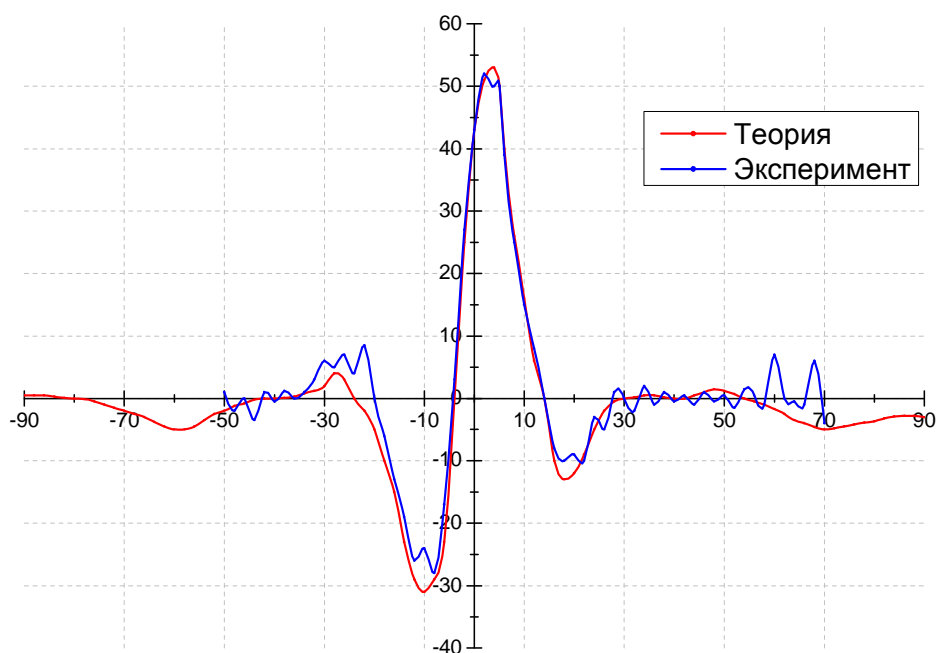


Рис. 9. Теоретическая и экспериментальная диаграммы направленности с учетом разных электрических длин.

Таким образом, теория с достаточной точностью (~5%) объясняет эксперимент. В процессе экспериментальных исследований был обнаружен ряд проблем, возникающих при измерениях ДН радиометров. Уровень сигнала радиометра сильно зависит от окружающей температуры, при проведении эксперимента приходилось поддерживать постоянную температуру радиометра воздушным обдувом. Кроме того, для качественного измерения сцены обязательным было свести к минимуму собственные шумы радиометра посредством тщательной экранировки.

## Литература

1. Бахрах Л.Д., Кременецкий С.Д., Курочкин А.П., Усин В.А., Шифрин Я.С. Методы измерения излучающих систем в ближней зоне.– М.: Наука, 1985.
2. Balanis C.A. Antenna theory analysis and desing. 3-d edition.- John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, N. J. 2005.
3. Eliott R. S. Antenna theory and design.– Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N. J.
4. Pirogov, Yu. A., Gladun V. V., Shlemin I. V., Chzhen, S. P., Tischenko D. A., Timanovskiy A. L., Lebedev A. V. Superresolution and coherent phenomena in multisensor systems of millimeter-wave radio imaging // Passive Millimeter-Wave Imaging Technology VI and Radar Sensor Technology VII. Edited by Appleby R., Wikner D. A., Trebits R., Kurtz J. L. Proc. SPIE, Vol. 5077, pp. 110-120 (2003).
5. Hitoshi Nohmi, Seiki Ohnishi, Osamu Kujubu. Passive millimeter-wave camera with interferometric processing // Passive Millimeter-Wave Imaging Technology IX. Edited by Appleby R., Wikner D. A. Proc. SPIE, Vol. 6211, pp. 621104.1-621104.8 (2006).